

SÉRIE A. 1166

N° D'ORDRE :
2027

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Ch. JACQUET

Météorologiste à l'Institut et Observatoire de Physique
du Globe du Puy-de-Dôme

1^{re} THÈSE

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA RADIOACTIVITÉ DES EAUX
MINÉRALES ET DU MAGNÉTISME DES ROCHES VOLCANIQUES
DU DÉPARTEMENT DU PUY-DE-DÔME

Soutenue le 26 octobre 1928, devant la Commission d'Examen

MM. MAURAIN.....	<i>Président</i>
MICHEL-LEVY.....	} <i>Examineurs</i>
WEISS.....	

PARIS (V^e)

LES PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE

49, boulevard Saint-Michel, 49

**CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA RADIOACTIVITÉ
DES EAUX MINÉRALES
ET DU MAGNÉTISME DES ROCHES VOLCANIQUES
DU DÉPARTEMENT DU PUY-DE-DOME**

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

<i>Doyen</i>	C. MAURAIN, professeur, Physique du globe.		
<i>Doyens honoraires</i> ...	P. APPELL, M. MOLLIARD.		
	P. PUISEUX.		
	V. BOUSSINESQ.		
	A. JOANNIS.		
<i>Professeurs honoraires.</i>	H. LE CHATELIER.		
	H. LEBESGUE.		
	A. FERNBACH.		
	A. LEDUC.		
	Émile PICARD.....	Analyse supérieure et algèbre supérieure.	
	G. KOENIGS	Mécanique physique et expérimentale.	
	E. GOURSAT	Calcul différentiel et calcul intégral.	
	P. JANET	Électrotechnique générale.	
	F. WALLERANT....	Minéralogie.	
	H. ANDOYER	Astronomie.	
	P. PAINLEVÉ.....	Mécanique analytique et mécanique céleste.	
	Gabriel BERTRAND.	Chimie biologique.	
	Mme P. CURIE ...	Physique générale et radioactivité.	
	M. CAULLERY ...	Zoologie (Évolution des êtres organisés).	
	G. URBAIN	Chimie minérale.	
	Émile BOREL	Calcul des probabilités et Physique mathém.	
	L. MARCHIS.....	Aviation.	
	Jean PERRIN	Chimie physique.	
	Rémy PERRIER ...	Zoologie (Enseignement P. C. N.).	
	H. ABRAHAM	Physique.	
	M. MOLLIARD	Physiologie végétale.	
	E. CARTAN	Géométrie supérieure.	
	L. LAPICQUE	Physiologie générale.	
<i>Professeurs</i>	E. VESSIOT	Théorie des fonctions et théorie des transformations.	
	A. COTTON	Physique générale.	
	J. DRACH	Application de l'analyse à la géométrie.	
	Charles FABRY ...	Physique.	
	Charles PÉREZ ...	Zoologie.	
	Léon BERTRAND...	Géologie structurale et géologie appliquée.	
	R. LESPIEU.....	Théories chimiques.	
	E. RABAUD	Biologie expérimentale.	
	P. PORTIER	Physiologie comparée.	
	É. BLAISE	Chimie organique.	
	P.-A. DANGEARD ..	Botanique.	
	Paul MONTEL ...	Mécanique rationnelle.	
	P. WINTREBERT ..	Anatomie et histologie comparées.	
	O. DUBOSCQ	Biologie maritime.	
	G. JULIA	Mathématiques générales.	
	A. JOB	Chimie générale.	
	A. MAILHE	Étude des combustibles.	
	L. LUTAUD	Géographie physique et géologie dynamique.	
	Eugène BLOCH ...	Physique théorique et physique céleste.	
	Henri VILLAT ...	Mécanique des fluides et applications.	
	Ch. JACOB	Géologie.	
	P. PASCAL	Chimie appliquée.	
E. HÉROUARD	Zoologie.	E. DARMOIS	Physique.
E. PÉCHARD...	Chimie (Enseig ^t P. C. N.).	G. BRUHAT	Physique.
V. AUGER	Chimie analytique.	H. MOUTON	Chimie physique.
M. GUICHARD ..	Chimie minérale.	L. JOLEAUD	Paléontologie.
A. GUILLET ...	Physique.	M. JAVILLIER....	Chimie biologique.
G. MAUGUIN ..	Minéralogie.	A. DUFOUR	Physique (P. C. N.).
L. BLARINGHEM	Botanique.	F. PICARD	Zoologie (Évolution des êtres organisés.)
A. MICHEL-LÉVY	Pétrographie.		
A. DEREIMS ..	Géologie.	ROBERT-LÉVY ...	Zoologie.
R. DONGIER ..	Physique du globe.	L. DUNOYER	Optique appliquée.
A. DENJOY....	Calcul différentiel et intégral.	A. GUILLERMOND ..	Botanique (P. C. N.).
H. BÉNARD ...	Physique (P. C. N.).	A. DEBIERNE ...	Radioactivité.

Secrétaire..... Daniel TOMBECK

SÉRIE A, 1166

N° D'ORDRE :

2027

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Ch. JACQUET

Météorologiste à l'Institut et Observatoire de Physique
du Globe du Puy-de-Dôme

1^{re} THÈSE

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA RADIOACTIVITÉ DES EAUX
MINÉRALES ET DU MAGNÉTISME DES ROCHES VOLCANIQUES
DU DÉPARTEMENT DU PUY-DE-DÔME

Soutenue le 26 octobre 1928, devant la Commission d'Examen

MM. MAURAIN..... *Président*

MICHEL-LEVY..... }
WEISS..... } *Examineurs*

PARIS (V^e)

LES PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE

49, boulevard Saint-Michel, 49



CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA RADIOACTIVITE
DES EAUX MINERALES
ET DU MAGNETISME DES ROCHES VOLCANIQUES
DU DEPARTEMENT DU PUY-DE-DOME

A MONSIEUR CH. MAURAIN

Doyen de la Faculté des Sciences de Paris
Directeur de l'Institut de Physique du Globe de l'Université de Paris

A MONSIEUR P. WEISS

Membre de l'Institut
Directeur de l'Institut de Physique de l'Université de Strasbourg

Je dédie respectueusement ce travail

CH. JACQUET.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA RADIOACTIVITÉ DES EAUX MINÉRALES ET DU MAGNÉTISME DES ROCHES VOLCANIQUES DU DÉPARTEMENT DU PUY-DE-DOME

INTRODUCTION

M. Ch. Maurain a été mon premier maître ; je lui exprime ma respectueuse gratitude pour les marques de bonté et d'intérêt que j'ai reçues de lui ; je le remercie tout particulièrement de l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être mon président de thèse.

A M. P. Weiss qui m'a si aimablement accueilli dans son beau laboratoire, m'a prodigué ses conseils et a suivi attentivement les progrès de la partie de mon travail qui se rapporte au magnétisme des roches, j'adresse mes plus respectueux remerciements.

Mes recherches sur la radioactivité des eaux minérales ont été effectuées au laboratoire de l'Institut de physique du globe de Clermont-Ferrand, dont les ressources et le Bulletin ont été mis à ma disposition par son directeur, M. Mathias. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de mon affectueuse reconnaissance.

M. A. Lacroix, secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, m'a fait l'insigne honneur de s'intéresser à mes travaux en me fournissant des échantillons de

roches étudiées par lui-même. Je lui en exprime ma respectueuse gratitude.

Les conseils de M. A. Michel-Lévy m'ont été très précieux. Qu'il me soit permis de l'en remercier chaleureusement.

C'est pour moi un très agréable devoir de témoigner ma bien vive reconnaissance au Conseil d'administration de l'Institut d'Hydrologie et plus particulièrement à M. Bordas pour la subvention qui m'a été attribuée et à MM. Foëx et Forrer, de la Faculté des Sciences de Strasbourg, pour les bons conseils et les encouragements qu'ils m'ont toujours prodigués.

Je remercie de tout cœur M. P. Gauthier, directeur du Musée d'Histoire naturelle de Clermont-Ferrand pour l'intérêt et la sympathie qu'il n'a jamais cessé de me témoigner.

Radioactivité des eaux minérales

Origine des eaux minérales. — Pour certains géologues, les eaux minérales sont des infiltrations d'eaux superficielles descendues, par capillarité et sous l'influence de la pesanteur et de jeux de températures, à de grandes profondeurs de l'écorce terrestre où elles ont été portées à des températures élevées sans se vaporiser.

Pendant ce long et lent parcours souterrain, elles ont enlevé aux roches qu'elles imbibaient, les substances minérales qu'elles tiennent en dissolution. Rencontrant une cassure de l'écorce terrestre (diacalse ou faille) qui est un chemin de facile ascension, elles remontent rapidement à la surface.

Pour d'autres savants, les eaux des sources minérales n'auraient jamais vu le jour avant leur sortie du sol. Elles proviendraient de la vapeur d'eau que dégageraient des roches cristallines en fusion dans les couches profondes de l'écorce terrestre.

Pour d'autres savants encore, de l'hydrogène proviendrait des couches supérieures de la pyrosphère à très haute température et agirait sur les oxydes métalliques qui entrent dans la constitution des roches pour donner de l'eau. Celle-ci entraînée par les gaz, se dégagerait de la profondeur et donnerait naissance aux sources minérales.

Les eaux d'origine profonde sont dites « eaux juvéniles » (1).

(1) Ed. SUESS : *La Face de la Terre*, t. III, chap. XXIV (*Les profondeurs*).

Objet du présent travail. — Dans le présent travail, nous nous sommes proposés de montrer les relations qui existent entre la radioactivité des eaux minérales du département du Puy-de-Dôme et la nature des terrains qu'elles traversent.

Nous avons étudié plus de 400 sources minérales dont un certain nombre n'avaient pas encore été signalées. Ce sont les résultats de cette étude que nous allons exposer.

Aperçu géologique sur le département du Puy-de-Dôme. — Le socle du département du Puy-de-Dôme est constitué par des roches schisto-cristallines et des roches granitiques. Elles constituent la chaîne du Forez et du Livradois, à l'est du département et forment le vaste plateau sur lequel sont installés les massifs volcaniques du Mont-Dore, du Cézalier et de la chaîne des Puys.

Les terrains schisto-cristallins qui proviennent de terrains sédimentaires et autres métamorphisés sont les formations géologiques les plus anciennes du département du Puy-de-Dôme.

Les granites leur sont postérieurs, car ils se sont mis en place au milieu de ceux-ci. Cette mise en place s'est très vraisemblablement faite au Dinantien, comme cela a été constaté dans le Morvan, par M. Albert Michel-Lévy (1).

Les nombreux filons de granulites, d'aprites, de pegmatites, qui sont injectés à travers les granites et les roches schisto-cristallines, se formèrent à la même époque ou presque immédiatement après. Pendant le

(1) Albert MICHEL-LÉVY : *Les terrains primaires du Morvan et de la Loire*, 1908.

Carbonifère inférieur eurent lieu les éruptions porphyriques du Massif Central : les tufs signalés par de Launay, qui sont si abondamment développés dans le nord du département du Puy-de-Dôme et les nombreux filons et massifs intrusifs de porphyres (microgranites) de la même région.

Au Carbonifère moyen, le Massif Central fut grandement affecté par les mouvements orogéniques qui donnèrent naissance à la chaîne hercynienne. Il y eut production de plis et formation de puissantes nappes de charriage dont l'existence a été signalée par M. Termier (1) pour la région de Saint-Etienne et par M. Albert Michel-Lévy pour les montagnes du Lyonnais. C'est dans les dépressions ouvertes entre les plis de cette chaîne de montagne et occupées par des lacs que furent entraînés les végétaux qui ont donné naissance à la houille des bassins houillers du Massif Central.

Ces derniers, au Permien moyen, furent plissés dans une dernière phase des mouvements orogéniques hercyniens.

Durant le Permien, il y eut aussi des éruptions volcaniques, mais d'intensité moindre que celles du Carbonifère.

D'abondantes venues hydrothermales formèrent, au Trias, les nombreux filons de quartz que l'on observe dans nos régions. Le département du Puy-de-Dôme, avec la majeure partie du Massif Central, resta exondé pendant toute l'ère secondaire. Au début du tertiaire, toute la région avait été à peu près nivelée par l'érosion

(1) TERMIER : *Congrès géologique international, XIII^e session. (Etat actuel de nos connaissances sur la tectonique du Plateau Central français).*

et le Massif Central constituait une vaste pénéplaine qui s'élevait à peine au-dessus du niveau des mers.

Les mouvements orogéniques qui donnèrent naissance à la chaîne des Pyrénées, à la fin de l'Eocène, provoquèrent la formation de dépressions dans le Massif Central.

Ces dépressions entrèrent en relation avec les mers de la région méditerranéenne et avec celles du bassin Parisien et furent occupées pendant l'Oligocène par des lagunes ou des lacs d'eau douce. Elles s'approfondissaient au fur et à mesure qu'elles se comblaient, ce qui explique la grande épaisseur de sédiments déposés dans la Limagne.

Les mouvements orogéniques qui dressèrent la chaîne des Alpes, principalement à la fin de l'Oligocène et pendant le Miocène, eurent leur contre-coup dans le Massif Central. Les lacs s'asséchèrent, les plis formés par les dépressions qu'occupaient ces lacs se resserrèrent et ces dépressions s'effondrèrent le long des failles qui prirent naissance, tandis que s'exhaussaient les anticlinaux qui les séparaient. La Limagne s'est affaissée entre la chaîne du Forez et du Livradois d'un côté et la plate-forme qui supporte les massifs volcaniques du Mont-Dore, du Cézalier et de la chaîne des Puys, de l'autre. A partir de ce moment, l'érosion sculpta peu à peu notre pays et finit par lui donner la configuration topographique qu'il possède actuellement.

Par les failles produites, montèrent de la profondeur, durant la fin du Miocène et surtout pendant le Pliocène, les laves qui coiffent les collines de la Limagne de leurs puissantes coulées et les projections et les laves qui constituent les massifs volcaniques du Mont-Dore et du Cézalier. Les sommets élevés de ces deux derniers

massifs furent recouverts par des glaciers pendant la fin du Pliocène supérieur et durant le début du Quaternaire.

Ce n'est que vers le milieu du Quaternaire, après le retrait des glaciers, que firent éruption les volcans à cratères de la chaîne des Puys dont les coulées occupent presque le fond des vallées.

Si les volcans d'Auvergne ne donnent plus de projections volcaniques ni de coulées de laves depuis longtemps, ils ne sont pas arrivés à la période de repos absolu, car ils émettent encore actuellement d'abondantes quantités d'acide carbonique. Ce dernier facilite et active la montée des eaux des nombreuses sources minérales qui existent en Auvergne et augmente leur pouvoir dissolvant.



FIG. N° 1

SOUS-SOL CRISTALLIN DU DÉPARTEMENT DU PUY-DE-DOME
ABSTRACTION FAITE DES TERRAINS SÉDIMENTAIRES
ET VOLCANIQUES

Dans un rapport sur *l'Origine et l'hydrologie des eaux thermales radioactives* (1), présenté au Congrès d'Hydrologie médicale à Lyon, en 1927, M. Urbain, chef des travaux pratiques d'hydrogéologie à l'Institut d'Hydrologie du Collège de France, s'aidant de toutes les données connues jusqu'ici et relatives tout au moins aux roches européennes, a essayé un exposé synthétique de l'origine des eaux thermales radioactives.

Il est fréquent que les sources thermales à radioactivité très élevée apparaissent sur les bords ou à l'intérieur de massifs constitués par des roches granitiques. On en conclut que le granite présente *une teneur exceptionnelle en radium dispersé*, supérieure aux 0 gr. 002 par tonne observés dans les roches acides.

Les roches granitiques sont composées de trois éléments essentiels : quartz, feldspath et mica accompagnés parfois d'amphiboles et pyroxènes, avec de nombreux minéraux accessoires : apatite, zircon, sphène, oligiste, fer titané, etc.

La quasi-totalité du radium est rassemblée dans les micas blancs ou *muscovites*, alors que les micas noirs ou *biotites* en sont à peu près dépourvus. On sait déjà que la plupart des minéraux primaires d'uranium-radium ont la pegmatite pour gangue. Les pegmatites sont les roches éruptives sur l'origine et le mode de formation desquelles on a le plus discuté.

M. Lacroix, qui a eu l'occasion de visiter de nombreux gisements de cette roche en différents pays d'Europe ou d'Amérique a été amené, après son explo-

(1) P. URBAIN : *XII^e Congrès international d'hydrologie, de climatologie et de géologie*, Lyon 8 au 11 octobre 1927. Rapport de la section de géologie : *L'Origine géologique des eaux minérales radioactives*.

ration de Madagascar, à déclarer (1) que les pegmatites sont en relation minéralogique et génétique avec les granites. Elles sont des granites à grands éléments et surtout caractérisées par des éléments borés, hydroxydés, fluorés ou par des minéraux rares qui n'existent qu'en proportions infinitésimales dans les granites ou même ne s'y trouvent pas.

La composition des pegmatites est essentiellement le quartz et un feldspath, et celui-ci est l'orthose, mais plus souvent un microcline. Ils semblent l'un et l'autre dépendre du mode de formation de la roche et ce caractère est assez constant pour permettre de classer les pegmatites en potassiques contenant des gemmes et des minéraux uranifères et en sodo-lithiques à césium.

Le mode de formation, d'après de nombreuses observations sur des pegmatites en exploitation, paraît, sans nul doute, être dû aux magmas granitiques dont ces roches sont le dernier terme de consolidation. Les nombreuses inclusions liquides du quartz des pegmatites démontrent que l'eau a joué un grand rôle dans leur formation. Sur certains points, les filons de pegmatite se chargent de silice au point de devenir de vrais filons de quartz renfermant de loin en loin des cristaux de feldspaths noyés dans le quartz. En d'autres points, les éléments de la pegmatite se réduisent de proportions et on voit la roche devenir granuleuse, c'est une roche nouvelle, l'aplite admettant des minéraux accidentels identiques à ceux de la pegmatite.

En résumé : 1^o Les pegmatites se réduisent à deux éléments constitutifs (quartz et feldspaths), tantôt très

(1) A. LACROIX : *Minéralogie de Madagascar*, t. II et III.

volumineux (pegmatite proprement dite), tantôt très petits (aprites) ;

2° L'une ou l'autre de ces roches peut admettre des minéraux fluorés, borés, etc., de volumes différents et peut aussi se terminer à leurs extrémités par le quartz seul ;

3° Les pegmatites et les aprites sont originaires des magmas granitiques, quelle que soit leur roche d'encaissement.

Les granulites et les pegmatites peuvent atteindre des teneurs en radium dix à cinquante fois plus fortes que les granites ordinaires.

Il est possible que les éléments radioactifs n'entrent pas dans la composition des micas muscovites, mais plutôt dans celle du *zircon*, qui les accompagne fréquemment (ZrO^2 , SiO^2). Des impuretés nombreuses où figurent des *terres rares*, accompagnent le zirconium dans les zircons. Les éléments radio-actifs interviendraient comme *impuretés secondaires* des zircons ; les muscovites étant toujours fluorifères, on suppose que le fluor a favorisé la migration de tous les éléments existant dans les zircons, ce qui est confirmé par la présence fréquente de la fluorine dans les filons de quartz qui servent de gangue aux minéraux radioactifs du genre pechblende ou autunite.

M. Urbain dégage les conclusions importantes suivantes :

1° Les sources radioactives doivent se rencontrer de préférence dans les régions à sous-sol cristallin ou au pourtour des appareils volcaniques en activité ou récemment éteints ;

2° Toutes choses égales d'ailleurs, on aura plus de chance de rencontrer des sources à radioactivité élevée

dans les roches *acides*, riches en muscovite, en zircons, en éléments fluorés, etc., que dans les autres types de roches.

Ces sources peuvent être divisées en deux catégories :

a) Les sources qui doivent leur radioactivité à leur passage à travers des filons où les éléments radioactifs existent à l'état *concentré* ; c'est le type *filonien* ;

b) Les sources qui doivent leur radioactivité à leur passage à travers des roches où les éléments radioactifs n'existent qu'à l'état *dispersé* qui représente leur mode de gisement *normal* ; c'est le type *normal*.

Il existe certainement des sources qui doivent leur radioactivité simultanément à des radio-éléments *dispersés* et à des radio-éléments *concentrés*. M. Urbain appelle source *mixte* ce nouveau genre qui doit se rencontrer dans les mêmes régions que le type filonien.

La source Lepape, à Bagnères-de-Luchon, dont la radioactivité atteint 41,5 millimicrocuries par litre d'eau, appartient au type normal. La source de Châtel-don, dans le Puy-de-Dôme, dont sa radioactivité qui dépasse 105 millimicrocuries, à la proximité immédiate de filons d'autunite et de chalcolite ; c'est, jusqu'à présent, le meilleur exemple français des sources du type filonien. Enfin la source des Romains, à Sail-les-Bains (Loire), dont la teneur en radon dissous est de 67 millimicrocuries par litre, paraît appartenir au type mixte.

Le fait que nous nous sommes résolument et strictement renfermés dans les limites du département du Puy-de-Dôme, ne nous permet guère de formuler un jugement valable sur une classification d'une portée aussi générale. Rappelons ici qu'en signalant le premier, en juin 1926, la teneur élevée en radon dissous de la

source de Châteldon-Montagne, nous avons également spécifié son caractère filonien.

Les émanations du radium, du thorium et de l'actinium, doivent à leur état gazeux leur facile diffusibilité à travers les pores du sol, et leur solubilité dans l'eau charge celle-ci de ces trois émanations. La courte existence de l'émanation du thorium et de l'émanation de l'actinium a pour conséquence la rapide saturation de ces deux émanations ; aussi les mesures faites par un certain nombre d'auteurs et notamment par A. Lepape (1) permettent de conclure que le thoron n'existe pratiquement pas, sauf exceptions aux griffons des sources minérales. Ce savant attribue l'absence du thoron au fait qu'il s'écoule plus de dix minutes (durée pratiquement totale de la vie du thoron) entre le moment où l'eau s'est en dernier lieu chargée de thoron et celui où elle apparaît au jour. Quant à la vie moyenne de l'actinium, elle ne dépasse pas cinq secondes et la durée pratiquement totale de sa vie une demi-minute. Les émanations du thorium et de l'actinium ne présenteraient donc pour cette étude qu'un intérêt restreint. Il n'en est pas de même pour l'émanation du radium à vie beaucoup plus longue. Il est naturel d'admettre, *a priori*, que toutes choses égales d'ailleurs, la quantité d'émanation du radium dissoute est proportionnelle à la quantité de radium avec laquelle cette eau s'est trouvée en contact. L'étude de la radioactivité des sources doit nous faire connaître l'emplacement des gîtes radioactifs ; c'est donc, en somme, une méthode de prospection préliminaire.

(1) A. LEPAPE : *C. R.* 1924, t. CLXXVIII p. 931 (*Sur les recherches de l'émanation du thorium (thoron) dans les sources hermales par la méthode de l'activité induite*).

Un grand nombre de travaux ont eu pour objet l'étude de la radioactivité des eaux. Le premier mémoire paru est celui de J. J. Thomson, en 1902, sur les eaux de Cambridge. Elster et Geitel, en 1903, décelèrent le radium dans les eaux de Bar-Nauheim. En France, les premières publications, celles de Curie et Laborde, datent de 1904 et furent corrigées et complétées en 1906. Ils étudièrent la radioactivité d'un certain nombre de sources d'établissements thermaux. L'attention fut alors appelée en France sur la radioactivité des eaux minérales. Les principaux travaux parus depuis cette date sont ceux de Moureu et Lepape notamment, ceux de Brochet et Diénert, du regretté D^r Loisel, etc.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Nous avons utilisé un électroscope Danne à feuille d'or, de quinze unités électrostatiques de capacité. La tige supportant la feuille est isolée à l'ambre. Une tige latérale permet de charger le système à un potentiel convenable, au moyen d'un bâton d'ébonite. La feuille d'or est visée par une lunette à oculaire micrométrique, que l'on fixe en azimut et hauteur. L'appareil porte à sa partie inférieure un disque d'oxyde d'urane. L'uranium ayant une période très longue (5×10^9 années), son rayonnement est pratiquement constant, et les rayons émis par ce disque produisent à l'intérieur de l'électroscope un courant d'ionisation constant. On détermine l'intensité de ce courant, en le compensant par la décharge électrique produite par la déformation d'un quartz piézo-électrique. Le nombre : $0,9 \times 10^{-11}$ ampère, a été obtenu comme mesure de courant de saturation dû au rayonnement de l'oxyde

d'uranium. L'appareil en place, la lunette calée en azimut et hauteur, on choisit pour les mesures un intervalle convenable (vingt petites divisions générale-

ment). On mesure d'abord le courant de déperdition dû à la fuite spontanée d'une part et au rayonnement pénétrant de l'autre. Soit t' le temps de chute en secondes que la feuille d'or met à tomber dans l'intervalle choisi sous l'action de la déperdition.

On charge à nouveau l'appareil et on découvre le disque d'urane au moyen de deux manettes qui se trouvent à l'extérieur. La feuille d'or descend assez rapidement : si t est le temps de chute entre les deux mêmes divisions que précédemment, l'intensité du courant d'ionisation sera :

$$I = A \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t'} \right)$$

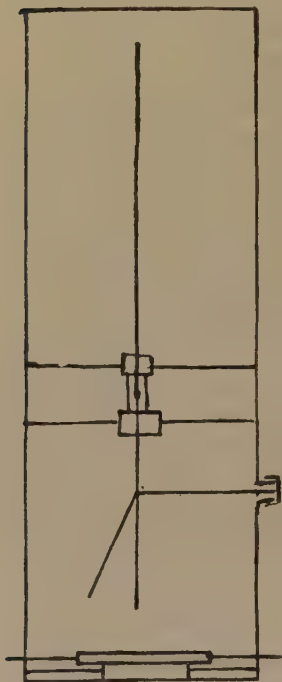


FIG. N° 2

On connaît I par l'étalonnage, t et t' par l'expérience ; on en déduit A , constante de l'appareil pour l'azimut et la hauteur adoptés. Il va sans dire que nous opérons toujours sous un voltage suffisamment élevé.

Quelles que soient la nature de l'isolant et la grandeur de la charge utilisée pendant les premières minutes, il y a généralement une chute rapide de la feuille d'or, chute due à la pénétration dans l'isolant de charges

électriques et à une polarisation partielle du diélectrique. Aussi nous prenons la précaution, avant toutes mesures, de charger l'appareil à un fort potentiel et de le laisser ainsi pendant une heure au moins. L'émanation du radium est recueillie dans un condensateur Danne. C'est un cylindre de laiton de 11 cm. de diamètre et 21 cm. de hauteur, portant, suivant son axe, une tige de laiton isolée à l'ambre, tige que l'on met en communication avec la tige isolée de l'électroscope. Un robinet à pointeau, placé sur le côté, permet l'introduction du gaz.

Ce condensateur ayant une forme géométrique régulière, on peut utiliser pour le dosage de l'émanation la formule de Duane-Laborde, que ces auteurs ont établie en se servant de condensateurs de très grandes dimensions.

Désignons par i_m l'intensité du courant produit par un curie d'émanation dans un condensateur ayant une surface intérieure totale S et un volume V , on a

$$i_m = 2.10 \left(1 - 0,572 \frac{S}{V} \right) \times 10^{-3} \text{ ampères.}$$

Dans le cas particulier du condensateur Danne, si i est l'intensité maxima en ampères $\times 10^{-11}$, la quantité d'émanation produite par le condensateur est donnée par $q = i \times 0,008$ microcuries.

Pour étudier l'émanation du radium dissous dans l'eau, nous prélevons à la source plusieurs litres d'eau que nous transportons au laboratoire dans des récipients hermétiquement clos. Nous faisons toujours plusieurs dosages pour éliminer les causes d'erreurs et nous adoptons la moyenne, la concordance étant considérée comme satisfaisante lorsque les écarts sont de l'ordre de 3 %. Nous aspirons une certaine quantité

d'eau (environ 500 cm³) dans un ballon d'un litre. Ce ballon est fermé par un bouchon de caoutchouc percé d'un trou par lequel passe l'extrémité inférieure d'un réfrigérant à quatre boules. L'autre extrémité du réfrigérant est reliée par un tube de verre à un tube en Y et est connectée à l'une de ses branches par un fort tube de caoutchouc. La deuxième branche est reliée à un manomètre à mercure à air libre et la troisième à la longue tubulure d'un flacon laveur de Durand. Dans ce flacon laveur, on introduit du mercure sur une hauteur de 3 cm. environ. La deuxième tubulure du flacon laveur est reliée à un tube de verre contenant du coton ordinaire pour arrêter les gros ions et les poussières. L'autre extrémité du tube de verre est reliée par un fort tube de caoutchouc au robinet pointeau du condensateur.

Marche de l'opération. — On fait circuler l'eau dans le serpentín et on chauffe le ballon. Chaque fois que la dénivellation manométrique dépasse 4 centimètres, on ouvre le pointeau du condensateur. Tant qu'il se dégage des gaz, le niveau manométrique monte. Lorsqu'en pleine ébullition l'eau est surmontée de la vapeur seule, la pression reste constante. L'opération achevée, on déconnecte le flacon laveur, on remplit alors le condensateur d'air inactif ayant barboté à l'intérieur du flacon laveur, pour entraîner l'émanation qui peut y être contenue et on amène la pression à l'intérieur du condensateur à celle de l'atmosphère.

On porte le condensateur sur l'électroscope et on fait généralement une première mesure, qui donne une idée de la teneur en émanation du radium de l'eau minérale étudiée. La mesure définitive se fait trois heures

après le temps pris comme début de l'activation du condensateur, c'est-à-dire à la fin de l'ébullition. On chronomètre le temps en secondes de chute de la feuille d'or entre les deux divisions choisies de l'oculaire micrométrique, puis on fait rapidement le vide dans le condensateur et on le remplit d'air inactif. Quand on a affaire à une forte radioactivité, il est indispensable de vider deux fois de suite le condensateur de mesure, c'est-à-dire de le laver avec de l'air inactif. On note l'heure précise du vide et on s'arrange, le condensateur étant rempli d'air inactif à la pression atmosphérique, pour faire une mesure d'activité 15 minutes après que l'on a fait le vide. Cette mesure sert à calculer le courant de déperdition à l'instant de l'expérience. L'expérience a montré que lorsqu'on chasse d'un condensateur, au bout de trois heures, l'émanation du radium, le courant d'ionisation résiduel, qui est dû au rayonnement du dépôt actif à vie courte, est les 57/100 du courant total. D'autre part, l'étude de la désactivation d'une plaque activée par l'émanation du radium a montré à Curie et Danne qu'au bout de 15 minutes après le début de la désactivation, début qui correspond au temps du vide fait dans le condensateur, cette activité a baissé de moitié. En conséquence, l'activité restante au bout de 15 minutes dans le condensateur est les 285/1.000 du courant mesuré 15 minutes auparavant.

Appelons I_m l'intensité maximum. $I_m = I_1 - I$ déperdition, I_1 est l'intensité mesurée expérimentalement.

Au bout de 15 minutes, puisque I_m descend à 0,285 de sa valeur, nous avons :

$$0,285 I_m = I_2 - I \text{ dép.}$$

I_2 est la valeur du courant mesuré 15 minutes après la fin de l'activation.

D'où, avec l'hypothèse que, pendant les 15 minutes considérées, le courant de déperdition n'a pas varié.

$$I \text{ déperdition} = \frac{I_2 - 0,285 I_1}{1 - 0,285}$$

Ceci étant, on calcule I_m en valeur absolue et si I_m est mesurée en 10^{-11} ampères, la quantité d'émanation contenue dans le condensateur est, comme nous l'avons déjà dit, égale à $I_m \times 0,008$ microcuries.

Il arrive fréquemment qu'un temps notable s'est écoulé entre le prélèvement au griffon et l'ébullition. Pour avoir la quantité d'émanation présente au moment du prélèvement, il faut tenir compte de la perte spontanée de l'émanation.

La formule qui intervient est :

$$Q' = 0,008 I_m \times \frac{1}{e^{-\lambda t}}$$

t étant le temps écoulé depuis le prélèvement. Il nous est arrivé quelquefois de n'avoir pu faire les mesures au bout de trois heures ; nous introduisons alors au dénominateur un deuxième facteur $e^{-\lambda t}$, t étant le temps écoulé depuis trois heures après l'introduction de l'émanation.

Nous avons émis l'hypothèse que, pendant 15 minutes, le courant de déperdition n'a pas varié. Il n'en est pas toujours ainsi et cela est une cause d'erreur appréciable quand il s'agit de faibles teneurs en radium. Nous avons suivi les variations de déperdition avec un second électroscope Danne ; toutefois on peut tabler sur un résultat certain, en faisant la moyenne des résultats de quatre dosages.

DÉTERMINATION DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE (1)

La détermination de la conductivité électrique est la plus rapide et la plus sensible des déterminations physiques. C'est une méthode préconisée depuis longtemps ; en 1897, Lehnert concluait à une proportionna-

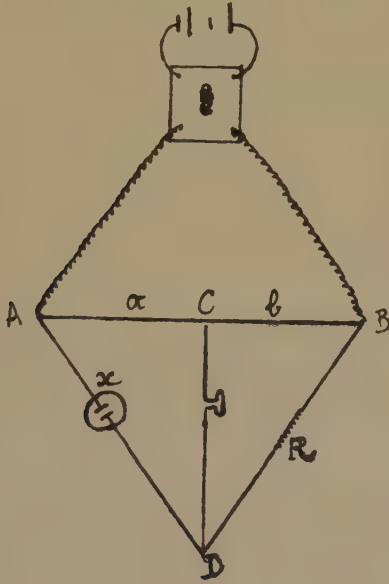


FIG. N° 3

lité approchée entre l'extrait sec d'une eau et sa conductivité.

La mesure de la résistance d'une solution saline est fondée sur le principe du pont de Wheastone.

Dans le dispositif de Kohlrausch, afin d'éviter l'électrolyse des solutions, on emploie les courants alternatifs fournis par la bobine d'induction.

(1) TOUPLAIN : *Analyse des eaux thermo-minérales*, 1922.

Une différence de potentiel étant établie entre les points A et B, si nous faisons varier les résistances a , b , x , R de telle sorte que la différence de potentiel entre C et D soit nulle (zone de silence du téléphone), nous avons la relation :

$$\frac{a}{b} = \frac{x}{R} \quad \text{d'où } x = R \times \frac{a}{b}$$

Le point de contact C peut se déplacer sur AB et faire varier les résistances a et b .

Le fil AB n'est pas régulièrement résistant dans la pratique, aussi est-il calibré en déterminant, pour toutes les positions C du curseur sur AB, les valeurs successives de $\frac{a}{b}$.

La résistance inconnue est constituée par une cuve à électrodes platinées, dans laquelle on place l'eau à analyser et un thermomètre. Comme dans la pratique les électrodes n'ont pas un écartement de 1 cm. et la colonne de liquide une section de 1 cm², la résistance à la cuve d'une eau ne correspond pas à la résistance spécifique cherchée. Pour en tenir compte, il suffit de multiplier la résistance à la cuve par un coefficient K dit « constante de cuve », qui tient compte de toutes les conditions d'expérience. Cette constante est obtenue en prenant une solution titrée de chlorure de potassium $\frac{N}{50}$, dont la résistance spécifique a été bien déterminée et trouvée égale à 416,8 ohms pour la température de 18°.

Nous avons $r = K \left(R \frac{a}{b} \right) = 416,8 = KX$. (Cette valeur de K correspondant à un volume déterminé de

liquide, nous avons tracé sur la cuve un repère de niveau)

$$\text{d'où } K = \frac{416,8}{X} \quad (1)$$

Nous avons utilisé pour les opérations faites aux sources un appareil portatif de petites dimensions, l'audit-ohmmètre de Chauvin-Arnoux, fondé sur le principe du pont de Kohlrausch. Les quatre branches du pont sont formées par : la résistance à mesurer, une résistance de comparaison réglable et un cylindre-rhéostat divisé en deux parties par un curseur mobile sur une règle graduée. L'ensemble est monté sur une table en ébonite portant en avant le cylindre du curseur-rhéostat et sa règle graduée, à gauche les bornes de liaison au téléphone et le bouton servant à actionner la bobine d'induction, à droite les bornes pour relier la résistance à mesurer ; en arrière les bobines de comparaison au nombre de quatre : 10, 100, 1.000, 10.000 ohms.

La table d'ébonite est fixée dans une boîte contenant la bobine de Ruhmkorff et son condensateur. Deux éléments de pile servent à actionner la bobine.

L'audit-ohmmètre de Chauvin et Arnoux permet la mesure des résistances polarisables comprises entre 1 mégohm et 0,1 ohm.

(1) Exemple pour une eau de Royat (source Saint-Mart) :
(La solution de KCl ayant donné une résistance à la cuve $X = 56$ ohms 0, $K = \frac{416,8}{56,0} = 7,44$)

Résistance à la cuve trouvée.	27 ohms 85
Résistance spécifique.....	$r = 27,85 \times 7,44 = 207$ ohms 20
Conductivité	$x = \frac{1}{r} = \frac{1}{207,20} = 0,00483$ ou $4,83 \times 10^{-3}$

DOSAGE DU RADIUM DANS LES ROCHES

Au voisinage d'un affleurement d'un filon de quartz, près de la source de Châteldon-Montagne, nous avons prélevé plusieurs échantillons de roche pour en déterminer la teneur en radium. Nous avons étudié également les larges plaques de micas des roches d'émergence des sources du Bouchet.

Chaque échantillon est finement pulvérisé et intimement mélangé et 200 grammes de substance sont soumis à l'analyse. Pour en extraire le radium, il faut le rendre soluble. Comme il n'y a que le carbonate de radium qui soit soluble, nous le transformons en carbonate.

Nous faisons d'abord la transformation en sulfate, car le sulfate s'attaque très bien par le carbonate de soude. Pour effectuer la transformation en sulfate, nous faisons une fusion avec du bisulfate SO^4KH pur et fondu en ajoutant un peu de sulfate de barytè, puis nous commençons à chauffer doucement, ensuite graduellement jusqu'au rouge que nous maintenons pour avoir un mélange fondu bien rouge et très uniforme. Après refroidissement, nous traitons par l'eau distillée. Le dépôt solide restant au fond du creuset est préalablement broyé. L'excès de SO^4KH se dissout. Le résidu est du sulfate de baryum radifère. Nous remuons convenablement, filtrons et lavons à l'eau chaude jusqu'à ce que l'eau de lavage ne soit plus acide. Le précipité qui repose sur le filtre est mis dans une capsule de porcelaine. Pour transformer en carbonate, nous ajoutons du carbonate de soude et de l'eau et faisons bouillir pendant deux heures et demie en milieu concentré. Nous ajoutons de l'eau distillée et laissons décanter.

Nous décantons sur filtre et faisons plusieurs lavages à l'eau distillée (toujours par décantation) jusqu'à ce que les eaux ne précipitent plus par BaCl_2 . Nous attaquons alors le résidu par HCl (dilué de moitié environ), filtrons et lavons à l'eau chaude. Le filtrat est recueilli dans un ballon soumis à l'ébullition et nous notons l'heure de fermeture de ce ballon pour le dosage du radium.

Nous avons obtenu les résultats suivants :

N ^{os} D'ORDRE	ÉCHANTILLONS	Teneur en millièmes de milligr. par tonne
1	Châteljon-Montagne (au voisinage de la source captée)	31
2	— — — — —	112
3	— — — — —	43
4	— (arènes granitiques au voisinage de la source non captée)...	18
5	Bouchet (au voisinage de la source n ^o 1)	123
6	— — — — — n ^o 3	112
7	— — — — — du Château ..	101

La teneur en radium des roches au voisinage des filons reconnus radioactifs se présente ici bien supérieure aux 0,002 de milligrammes par tonne trouvés par Strutt (1) et d'autres auteurs.

ÉTUDE DES RÉGIONS GÉOLOGIQUES DU DÉPARTEMENT

L'examen d'une carte géologique du département du Puy-de-Dôme montre immédiatement que ce département peut se diviser, tant au point de vue géologique que topographique, en trois régions distinctes :

STRUTT : *Le Radium*, t. III p. 161, 1906 (*La distribution du radium dans la croûte terrestre et la chaleur interne de la terre*).

1° La plaine basse de la Limagne marno-alluviale, encadrée de falaises granitiques et le bassin d'Issoire ;

2° Le bombement granito-gneissique coupé sur son côté est d'une faille presque rectiligne bordant la Limagne et supportant en arrière le territoire volcanique du Mont-Dore et de la chaîne des Puys ;

3° La portion de la chaîne granitique du Forez qui couvre l'est du département, en bordant la Limagne par la ligne nette de ses failles jusque vers Courpière, puis s'étale vers l'ouest par le massif granito-gneissique du Livradois, ne laissant du prolongement de la Limagne vers le sud que des lambeaux surélevés qui la relient au bassin d'Issoire par les hauteurs volcaniques du bois de la Comté-d'Auvergne et le roc granitique de Four-la-Brouque.

Toutes ces régions sont bien caractérisées et doivent être étudiées séparément.

Nous croyons devoir commencer cette étude par le côté oriental du département (le Forez) à cause de sa constitution spéciale et la remarquable radioactivité de ses eaux minérales. Nous étudierons les sources situées sur les bordures de la Limagne avec celles des compartiments voisins.

Le Forez et le Livradois. — Le Forez est cette chaîne granito-gneissique qui relie les Cévennes au Morvan par les monts de la Madeleine et sépare la vallée de l'Allier de celle de la Loire. Son histoire géologique serait très intéressante à suivre, mais elle nous entraînerait hors du cadre que nous nous sommes tracés. Nous nous bornerons à l'étude de la partie qui intéresse le Puy-de-Dôme et qui n'est pas la moins curieuse. La partie du Forez qui pénètre dans le Puy-de-Dôme par le nord est absolument granitique et couvre le canton

de Châteldon. C'est une région montagneuse traversée par le Vauziron, cours d'eau qui se rend à l'Allier après avoir franchi la faille limite de la Limagne au chef-lieu de canton, faille qui fait buter les marnes tertiaires contre le granite en ce point.

De nombreux filons sillonnent ces granites dans la direction perpendiculaire à la faille bordière, soit presque EW. Les filons de quartz sont souvent améthysés et enfumés, à petits cristaux translucides disposés en rubans et très craquelés, fragmentés postérieurement à leur formation. Les vides laissés par ces fines cassures sont occupés par des paquets de cristaux lamellaires jaune-verdâtre de chalcopite (phosphate d'urane et de cuivre). Cette chalcopite se rencontre encore parsemée dans les épontes des filons et jusque dans les diaclases des granites encaissants ou même dans certains filons de fluorine dont elle tapisse les fissures. La position de ce sel d'urane dans les fissures des matériaux de remplissage fait naître l'idée très naturelle que l'arrivée de l'urane est bien postérieure à celle des filons dans lesquels il est logé. Il est possible que ce soit à la source qu'il faille attribuer les apports de phosphates d'urane dans les fissures des roches de la région.

Nous avons vu plus haut que le Forez, au nord, limite la Limagne très brusquement par une faille très nette. Cette même faille se poursuit avec diverses fluctuations jusqu'au delà de Thiers, vers Aubusson, au sud de Vodable-Ville.

A partir de ce point, une série de décrochements vers l'ouest indique le commencement du vaste territoire granito-gneissique du Livradois qui se détache du Forez granitique surélevé, et découpé en tranches par des failles nombreuses de direction NS. C'est à ces cassures

que les eaux minérales du Salet, comme celles des environs immédiats de Courpière et de Sermentizon, doivent leur existence. La source de Layat n° 1, à Courpière, sur la petite route de Saint-Flour, marque le point confluent de la grande cassure limite du cap du Livradois et des marnes oligocènes de la Limagne et d'une autre fracture NS. des plus importantes du Livradois. Il est difficile, à partir de Vollore-Ville, de suivre la grande faille limite occidentale du Forez, mais si on observe sur une carte géologique, ou mieux encore sur le terrain la longue théorie de filons de quartz qui s'alignent parallèlement au thalveg de la Dore et sur le prolongement de la faille observée le long du Forez, il est facile de trouver la suite de la limite de la Limagne, ou faille de Châteldon-Vichy, que la surrection du Livradois a masquée, mais que les eaux minérales anciennes ont jalonnée de leurs dépôts et dont les eaux minérales actuelles marquent encore nettement la trace.

Les filons et les failles dans le Forez comme dans le Livradois, sont légions et se trouvent aussi bien dans les granites que dans les lambeaux d'archéen. Souvent leur direction est NW.-SE., mais parfois opposée, ce qui semble provenir de décrochements latéraux par suite d'effets de torsion. La grande majorité des eaux minérales est située sur de tels accidents.

L'étude du Forez se poursuit naturellement dans le Puy-de-Dôme par celle du Livradois qui rattache le Forez aux monts du Velay et à la Margeride dans le sud et sud-ouest et détermine la bordure S. et ESE. de la Limagne. Ce massif est un diverticulum du Forez ou, si l'on veut, des monts du Velay et Margeride, puisqu'une longue série de failles NS. jalonnées par

des filons et des sources minérales, sépare et détache le Forez du Livradois. Mais sauf cet accident, le Livradois géographique continue le Forez sous la forme d'un cap de pénétration dans la Limagne. Ce cap, en forme angulaire de bastion, est limité au nord par les failles de Courpière et du Salet jalonnées par des sources minérales, celles de Courpière en particulier. La faille de Courpière s'étend vers le NNW. jusqu'à sa rencontre à angle droit avec une autre faille plus importante que nous appellerons faille de Neuville ; celle-ci borde le côté W. du Livradois jusqu'à Brenat, entre Issoire et Sauxillanges et doit se produire sous les atterrissements et les alluvions de l'Allier jusqu'à la rencontre de la faille occidentale du bassin de Brioude. Nous ne décrivons là que le pourtour du Livradois qui, comme on le voit, est un compartiment surélevé, tandis que la Limagne est un secteur effondré. Ce mouvement orogénique n'a pu se faire sans amener d'autres fractures. Si on parcourt la surface du Livradois, on rencontre des faisceaux de cassures qui divisent toute sa masse en secteurs allongés du NNE. au SSW. Les uns se sont affaissés entre les autres, conservant et enfouissant une partie des formations stratifiées tertiaires qui recouvraient toute la région avant l'action des efforts dynamiques venus du sud et de l'est. C'est à l'extrémité SSW. de ce faisceau de failles tertiaires et près de Sauxillanges que jaillissent les sources minérales de la Réveille n^{os} 1 et 2. La roche constitutive dominante du Livradois est le granite qui forme tout le nord et la moitié de la surface totale. Un vaste territoire de granulite occupe le centre (c'est le gîte principal des filons de quartz améthysés) passant immédiatement au granite et s'y rattachant par un point septentrional tandis que les gneiss granulitiques

ou micaschistes l'entourent de tous côtés. Vers le sud, ces mêmes gneiss se continuent dans la direction du Cantal et de la Haute-Loire rattachant le Livradois aux monts du Velay et de la Margeride. Le parcours effectué depuis le nord du Forez et le bassin hydrominéral d'Ambert jusqu'au près d'Issoire par le Livradois, nous a montré que, parmi les nombreuses sources minérales rencontrées, un grand nombre de celles-ci jalonnent des failles importantes ou naissent sur le trajet ou au contact de filons. Certaines d'entre elles présentent une radioactivité élevée.

Les failles (légion dans ce compartiment de l'est comme nous l'avons dit plus haut) facilitent dans une certaine mesure la circulation des eaux météoriques ; le trajet souterrain d'une partie d'entre elles est en conséquence réduit, leur minéralisation également. Circulant le plus souvent dans des canaux riches en émanations radioactives, elles dissolvent ces émanations dont une grande partie est conservée à l'émergence ; ce qui explique la teneur assez élevée d'un grand nombre de sources de cette région.

Il y a lieu de remarquer toutefois que des filons reconnus assez riches en chalcopite livrent quelquefois passage à des eaux dont la radioactivité est tout à fait faible. Exemple : source de Baffie. L'explication pourrait être trouvée dans le fait que des cristaux bien formés dont les faces sont encore inaltérées, c'est-à-dire dans lesquels la tension superficielle de la matière solide est énorme, sont des surfaces qui opposent à la corrosion une très grande résistance tandis que lorsque la partie superficielle des cristaux a été partout enlevée, la dissolution se fait avec une rapidité beaucoup plus grande et partant la radioactivité de l'eau émergeant du filon est plus élevée.

No d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Émanation du radium en milliémancouries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
9	<i>Courpière</i> De Laudent	1°10'2	45°45'2	15 juin 1925	Non mesuré	12°0	$2,92 \times 10^{-3}$	5,0	Émerge du granite dans une région très fracturée sillonnée de filons : granulite, microgranulite, quartz avec sabbine.
10	Layat n° 1	1°11'8	45°44'9	—	—	12°1	$3,27 \times 10^{-3}$	5,3	A l'intersection de 2 grandes failles qui segmentent le nord du Livradois (terrain granitique), l'une d'elles étant la faille limite de la Limagne et du Livradois.
11	— 2	1°11'5	45°44'7	—	3,3	12°0	$3,12 \times 10^{-3}$	5,1	Sur l'une des failles précédentes au voisinage de filons de granulite et de microgranulite.
12	Buvette Ligne	1°13'8	45°44'6	20 juin 1925	29,0	12°0	$4,40 \times 10^{-3}$	1,1	Émergent de diachases du granite
13	Du Puits	1°13'7	45°44'6	—	2,5	12°0	$3,63 \times 10^{-3}$	1,3	au voisinage d'une grande faille limite
14	Du Pré	1°14'2	45°44'6	—	4,8	12°0	$3,44 \times 10^{-3}$	1,5	de la Limagne et du pied du Forez.
15	Buvette Meinadier	1°14'2	45°44'6	—	5,0	12°1	$3,44 \times 10^{-3}$	1,4	
16	<i>Olmet</i> De la Terrasse	1°20'8	45°43'9	24 juin 1925	7,2	9°2	$0,25 \times 10^{-3}$	5,3	Sortent du gneiss granulitique dans une région sillonnée de filons de quartz et de filonnets de pegmatites.
17	<i>La Renautie</i> Moranges	1°22'0	45°43'7	—	4,2	10°4	$0,31 \times 10^{-3}$	9,8	
18	<i>Oliergues</i> De Chabrier-le-Bas n° 1	1°19'5	45°40'5	20 juin 1925	4,3	9°8	$0,64 \times 10^{-3}$	8,6	Dans granite normal au contact de micropegmatites.
19	— 2	1°19'4	45°40'4	—	1,0	9°7	$0,68 \times 10^{-3}$	8,4	Sort du granite au terminus de 2 filons placés dans le prolongement l'un de l'autre, l'un de granulite au nord, l'autre de quartz (*).
20	<i>Marat</i> Gripell	1°21'9	45°40'2	—	2,6	14°0	$0,34 \times 10^{-3}$	2,6	Sort du granite au contact d'un filon de quartz.
21	Du Got	1°18'7	45°39'7	—	1,2	6°5	$0,40 \times 10^{-3}$	1,2	

(*) Ils entrent dans le jalonnement de la grande faille limite du Forez formant la limite occidentale du bassin oligocène d'Ambert.

No d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Émanation du radium en milliunités par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
Tours									
22	De Tours	1°15'9"	45°38'8"	29 juin 1925	7,1	10°4	$1,40 \times 10^{-3}$	1,2	Granulite pyriteux altéré et quartz à tourmaline, lequel doit faire partie d'une pegmatite.
La Chapelle-Agnon									
23	Du Dousson	1°19'8"	45°38'1"	29 juin 1925	2,6	8°4	$0,30 \times 10^{-3}$	3,9	A la limite de deux lambeaux de granite gneissique dans le granite normal.
Bertignat									
24	Du Champ	1°20'9"	45°37'9"	5 juillet 1925	1,9	8°8	$0,17 \times 10^{-3}$	2,5	Sur le trajet d'une faille NNW-ESE, séparant le granite normal du gneiss granulitique au voisinage de filons de quartz.
Grandval									
25	De Chaussadis	1°21'3"	45°35'8"	—	20,0	11°4	$0,63 \times 10^{-3}$	4,8	Sort du granite au contact d'un filon de pegmatite.
26	De Pradis	1°21'9"	45°35'4"	—	4,2	11°2	$0,67 \times 10^{-3}$	4,2	
Verdolaye									
27	De Chalourcy	1°19'1"	45°36'4"	—	3,6	10°2	$0,33 \times 10^{-3}$	7,1	Granite à deux micas lardé d'un stockwerk de pegmatites à grands éléments de quartz à beryl muscovite et de tourmaline noire. Le microcline et le beryl sont plus ou moins kaolinisés.
28	Les Cottés	1°19'2"	45°36'1"	—	2,9	10°1	$0,34 \times 10^{-3}$	6,8	
Verdolaye									
29	De la Gare	1°22'2"	45°38'7"	8 juillet 1925	1,9	10°2	$0,14 \times 10^{-3}$	2,6	Gneiss granulitique et filon de pegmatite, sur la grande faille occidentale du Forez.
30	Du Gare	1°22'7"	45°38'7"		1,4	10°0	$0,34 \times 10^{-3}$	4,3	
31	Du Bouchet n° 1	1°23'5"	45°38'8"		3,6	10°4	$1,20 \times 10^{-3}$	14,1	
32	— 2	1°23'4"	45°38'8"		2,9	10°2	$1,14 \times 10^{-3}$	17,3	
33	— 3	1°23'2"	45°38'8"		2,6	10°0	$0,96 \times 10^{-3}$	12,1	
34	— 4	1°23'4"	45°38'7"		4,1	10°2	$0,73 \times 10^{-3}$	11,8	
35	Château	1°23'5"	45°38'7"	—	2,8	10°3	$0,57 \times 10^{-3}$	8,9	
Job									
36	De la Bacherie n° 1	1°24'0"	45°38'1"	15 juillet 1925	7,6	11°8	$0,46 \times 10^{-3}$	4,7	
37	— 2	1°24'0"	45°37'9"	—	4,3	12°0	$0,28 \times 10^{-3}$	3,1	
38	De Sagnette	1°24'6"	45°37'0"	—	6,9	11°8	$0,43 \times 10^{-3}$	3,4	
39	De la Souche	1°25'2"	45°36'7"	—	2,1	11°4	$0,49 \times 10^{-3}$	4,4	

No d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 15°	Emission du radium en millièmes par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
40	<i>Valcivrières</i> D'Albafond	1°28'0"	45°35'0"	22 juillet 1925	7,1	10°9	$0,45 \times 10^{-3}$	1,6	Émerge du granite sur le trajet d'un filon de quartz et de granulite jalonnant une grande faille.
41	<i>Sauxillanges</i> De la Réveille n° 1	1°1'3"	45°34'1"	10 août 1926	5,0	12°0	$2,76 \times 10^{-3}$	2,5	Sur le trajet de l'une des failles du Livradois ayant déterminé l'effondrement d'un lambeau d'oligocène au contact du gneiss et du stampien inférieur.
42	— 2	1°1'5"	45°33'9"	—	4,1	11°9	$2,47 \times 10^{-3}$	2,3	
43	<i>Saint-Amant-Roche Savine</i> De Louchaux	1°17'4"	45°34'5"	15 juillet 1925	6,5	8°0	$0,27 \times 10^{-3}$	7,8	Dans terrain granitique sur le trajet de filons quartzo-plomboux. Gneiss granulitique. Dans le granite sur le trajet d'un filon quartzo-plomboux.
44	Des Querettes	1°17'4"	15°34'4"	—	2,6	8°0	$0,30 \times 10^{-3}$	2,2	
45	De la Payolle	1°16'3"	45°33'9"	—	13,6	7°0	$0,07 \times 10^{-3}$	4,2	
46	De Chenailles	1°17'4"	45°33'9"	—	5,6	7°7	$0,07 \times 10^{-3}$	6,0	
47	<i>Monestier</i> Des Escures	1°18'1"	45°33'4"	—	4,5	8°1	$0,13 \times 10^{-3}$	1,6	Sur le trajet de la faille NW.-SE. séparant le granite de Saint-Amant du gneiss granulitique de la région de Saint-Eloy.
48	<i>Ambert</i> De Saint-Pardoux	1°23'0"	45°33'4"	22 juillet 1925	1,6	10°8	$0,08 \times 10^{-3}$	1,4	Granite. Sur le trajet de la faille orientale du bassin d'Ambert séparant le granite de l'Oligocène. Granulite gneissique traversée par un filon de pegmatite avec oxydes de fer et de cuivre provenant de l'altération des sulfures.
49	De Roddes	1°23'6"	45°33'8"	—	1,0	12°0	$0,34 \times 10^{-3}$	3,1	
50	De Lachons n° 1	1°23'5"	45°33'7"	—	2,1	12°0	$0,31 \times 10^{-3}$	3,0	
51	— 2	1°23'6"	45°33'6"	—	2,8	11°9	$0,30 \times 10^{-3}$	3,6	
52	De Combrias	1°26'2"	45°33'8"	—	3,2	11°0	$1,40 \times 10^{-3}$	11,6	

N° d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Emission du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
Amberf (suite)									
53	De la Gerle	1°24'7"	45°33'0"	22 juillet 1925	4,1	10°8	$0,30 \times 10^{-3}$	1,2	Basse du stampien. Au contact du granite et d'un massif de granulite pegmatite.
54	De la Masse	1°24'2"	45°32'9"	—	2,3	11°0	$0,27 \times 10^{-3}$	2,8	
55	De la Combe-Basse	1°27'2"	45°32'5"	28 juillet 1925	2,6	10°1	$0,59 \times 10^{-3}$	3,2	
56	De Longchaux	1°27'3"	45°32'5"	—	3,0	10°5	$0,99 \times 10^{-3}$	4,0	
Grandrif									
57	De Grandrif	1°28'8"	45°30'6"	—	2,0	10°0	$1,00 \times 10^{-3}$	2,7	Gneiss granitique.
Saint-Clément									
58	De Saint-Clément	1°35'2"	45°30'3"	—	4,2	10°8	$0,27 \times 10^{-3}$	0,9	Filon de quartz, galène, chalcopryrite.
Saint-Just-de-Baffie									
59	De Baffie	1°28'9"	45°28'3"	—	1,8	9°0	$1,24 \times 10^{-3}$	0,6	Sur le trajet d'une grande faille NS. au contact des gneiss granitiques et gneiss granitiques et d'un filon de pegmatite présentant quelques paliettes de chalcoprite.
Arlanc									
60	Pompadour	1°23'3"	45°25'8"	—	3,5	10°0	$1,03 \times 10^{-3}$	1,3	En bordure des alluvions et des argiles sableuses de l'oligocène.
61	La Robertie	1°24'5"	45°25'2"	—	1,8	9°7	$0,58 \times 10^{-3}$	1,0	Dans les alluvions de la Dore.
Dore l'Eglise									
62	De la Dore n° 1	1°25'0"	45°22'9"	28 septembre 1925	2,8	8°3	$0,46 \times 10^{-3}$	0,4	Lit de leptinite dans les gneiss et alluvions en bordure d'un filon de granulite. Gneiss granitoïde traversé par filons de pegmatite apliquée à tour-maine noire. Pegmatite à tourmaine dans gneiss granitique.
63	De la Dore n° 2	1°25'3"	45°22'8"	—	2,1	8°4	$0,39 \times 10^{-3}$	2,1	
64	De la Dore n° 3	1°25'5"	45°22'7"	—	6,8	8°8	$0,64 \times 10^{-3}$	0,6	
65	De Bersac n° 1	1°26'3"	45°22'5"	—	3,2	11°3	$0,40 \times 10^{-3}$	6,4	
66	De Bersac n° 2	1°26'0"	45°22'5"	—	1,9	11°0	$0,27 \times 10^{-3}$	4,9	
67	De Bersac n° 3	1°26'2"	45°22'2"	—	2,8	11°8	$0,34 \times 10^{-3}$	5,2	
68	Du Charrial	1°25'6"	45°22'0"	—	4,0	10°5	$0,20 \times 10^{-3}$	2,8	
69	Du Montel	1°27'7"	45°21'6"	—	2,6	10°8	$0,26 \times 10^{-3}$	4,3	

Le compartiment granito-volcanique de l'ouest. — Examinons maintenant le grand territoire granitique de l'ouest du Puy-de-Dôme, qui sert de socle à la partie la plus volcanique du centre de la France par la multiplicité et la durée du phénomène jusqu'à l'apparition de l'homme. Ce territoire si complexe débute à l'est par une longue cassure ou plutôt une série de cassures entrecroisées sur une même ligne comme les torons d'un câble qui va du nord au sud du département. C'est là le lieu linéaire de rupture qui entraîna l'effondrement de la Limagne et l'exhaussement du massif granito-gneissique élevé aujourd'hui en falaise au-dessus de la plaine de la Limagne.

Une large bande de granite forme falaise et va en s'élargissant au sud sous le Mont-Dore et s'étend au nord jusqu'au département de la Creuse, embrassant dans ce mouvement de vastes lambeaux de gneiss et micaschistes percés des apophyses de ce même granite, dont le principal forme le massif de Gelles.

De nombreuses failles ont certainement divisé cette masse et doivent former, outre celles du front est, un curieux réseau que nous ne pouvons connaître en raison de l'épaisse cuirasse de matériaux volcaniques qui le recouvre. En dehors de cette surface masquée, nous trouvons, en effet, un réseau de failles riche surtout dans le sud de cette partie du département et montrant les gradins d'éboulement vers l'Allier.

Les eaux minérales de Saint-Myon sont captées dans un promontoire de roches, schistes micacés injectés de granulites, de granites traversés par des filons de microgranulite et de quartz entourés de compartiments d'argiles et arkoses du Samoisien ; l'ensemble est sillonné de cassures. Les eaux du district de Combronde,

un peu à l'ouest, sont partie dans les argiles sableuses, partie dans les alluvions de la Morge et près des tufs orthophyriques du Culm. Plus au sud, se trouvent les eaux de Rouzat, Gimeaux, Prompsat sur la grande faille limite qui semble se terminer là et est remplacée par des fractures dirigées en éventail de la falaise granitique vers la Limagne, puis, au milieu des lambeaux des granites et d'argiles gréseuses, naissent les sources de Châtelguyon.

De Châtelguyon à Châteauneuf, une bande de groupes d'eaux minérales s'étalent sur les granites, les gneiss et lambeaux de terrains anciens.

Dans la région de Châteauneuf, les granulites et les tufs orthophyriques du Culm sont sillonnés de filons de quartz à galène très argentifère qui recoupent la faille du Dinantien vers la double boucle que forme la Sioule en ce point. Les eaux minérales sont en relation évidente avec ces filons comme l'ont montré des travaux d'exploitation de ces filons. Nous rapprocherons du groupe précédent celui de Buffévent, près de Saint-Priest-des-Champs, sur les bords du ruisseau le Colis. Les sources sont réunies sur un petit espace auprès d'un filon de quartz traversant le granite.

Plus au sud et sud-ouest, on trouve les sources de Pontgibaud, situées sur les bords de la Sioule, dans une région granitique sillonnée de nombreux filons de quartz avec galène, baryte, etc. La source de Pulvérières est située sur un filon de granulite très près d'un filon de mispickel.

On trouve encore à l'ouest les sources de Pontaurmur s'écoulant au voisinage du chenal houiller et des tufs du Culm, à l'extrémité sud d'une puissante trainée de 40 kilomètres de longueur. Et bien que l'ouest du

département soit très granitique et pourvu d'un réseau très riche en filons de roches anciennes ou de quartz puissants et métallifères, les sources minérales sont rares.

Revenons à la bordure est et arrêtons-nous aux sources de Royat. Ces sources, dit M. Glangeaud (1) qui les a étudiées spécialement, sont au nombre de quatre thermales : Eugénie, Saint-Mart, César et Saint-Victor (35°6 à 20°8) et moyennement minéralisées ; deux sont tièdes, Marie-Louise et Fonteix (16°0 et 17°8) et trois froides et peu minéralisées : Velleda, Viaduc et Morator. Cette dernière a disparu. Tous les griffons de ces sources s'échelonnant de l'ouest à l'est sur un kilomètre environ de la vallée de la Tiretaine, remblayée en partie de cendres volcaniques issues de la chaîne des Puys, sont sur l'Oligocène. D'après ce géologue, la source Eugénie (nous avons évalué son débit à 800 litres par minute, débit qui s'est maintenu constant au cours de nos diverses observations échelonnées sur deux années), prend naissance dans la faille NS. qui redresse les arkoses oligocènes à 45° et est parallèle à la grande faille limite de la Limagne passant par Chateix et Gravenoire, et distante de 400 mètres de cette faille. La source Eugénie serait une source fumerollienne remarquable. Les autres sources sont situées sur des failles de l'Oligocène. La source dite « du Viaduc » est apparue vers la fin du siècle dernier, lors de la fondation de la pile d'où elle émerge. Vu sa minéralisation, elle doit entrer dans la même catégorie que les sources Saint-Marc et Saint-Victor.

(1) Ph. GLANGEAUD : *C.R.* 1927, t. CLXXXIV, p. 1299. *Sur l'origine des sources minérales fumerolliennes de Royat (Puy-de-Dôme).*

La source Fonteix est la plus radioactive du groupe (25,2 millimicrocuries). Elle semble située sur une faille qui va de la base ouest des côtes de Clermont à Montaudoux.

Nous avons suivi attentivement la vallée de Royat. Elle est, dans toute son étendue depuis sa naissance au pied du puy de Dôme, dans un cirque à ravines digitées, puis comblée au quaternaire par les laves aussi bien dans cette région haute que dans sa partie moyenne et basse constituée par le granite porphyroïde très altéré et sillonné : 1° de filons de granulite chargés de micas muscovites plus que de biotites ; 2° de filons de pegmatites dont un très visible près du chemin de La Pépinière ; 3° de filons de quartz avec barytine, galène et blende et presque tous dirigés parallèlement à la faille limite de la Limagne, soit NS. Il est possible qu'une partie de l'alimentation souterraine des eaux profondes qui se chargent de dissolutions minérales soit due à la pénétration des eaux météoriques dans ces granites décomposés dont tous les feldspaths et les micas sont en voie de kaolinisation lente et continue, surtout au contact des filons si nombreux qui participent en partie à la kaolinisation générale de la région. Il n'y a d'exception que, pour certaines portions des granites et des granulites qui, résistant à la destruction kaolinique, restent en masses arrondies sur le sol au milieu des arènes granitiques.

Les failles de cette région se prolongent vers Chamonat et Champeix, où elles ou leurs diaclases adjacentes font jaillir d'autres sources. Cette région de Champeix jusqu'à Murols est divisée en gradins effondrés successivement, et de là provient la richesse de son sol en eaux minérales.

Le bassin hydrominéral de Saint-Nectaire, aux multiples sources, a été étudié par M. Glangeaud (1), qui fait remarquer que ses devanciers sur le terrain, Michel-Lévy et J. Giraud avaient cru qu'il était composé d'un compartiment granitique surélevé par rapport à deux autres compartiments sannoisiens effondrés l'encadrant à l'est et à l'ouest. Or ce compartiment a été recouvert comme ses voisins de 200 mètres d'Oligocène et a été brisé par des failles conjuguées de direction NS. et EW., coupées presque à angle droit. C'est à ce morcellement que sont dues la topographie des lieux et la multiplicité des sources. Les débris d'oligocène restant sur quelques points des lèvres de failles surélevées vers 250 mètres, fournissent le moyen d'apprécier les mouvements des divers compartiments granitiques. Ces failles ont donné passage, sur le pourtour de Saint-Nectaire, à des roches volcaniques protégeant de leurs laves et débris les couches sannoisiennes et en même temps ayant servi de canaux d'ascension à des sources thermales. Il y a donc là, comme au Mont-Dore et à La Bourboule, un lien étroit entre le volcanisme et la sortie des eaux thermales.

Le bassin présente cinq failles principales NS. donnant accès à des eaux minérales chaudes (39°0 à 53°0) tandis qu'une grande quantité d'autres sources à basse température ou froides s'échappent des diaclases si nombreuses dans les granites, surtout au voisinage des failles.

(1) Ph. GLANGEAUD : C. R. 1924, t. CLXXVIII, p. 538. *Le bassin hydrominéral de Saint-Nectaire (Puy-de-Dôme) ; ses dislocations et son cadre volcanique. Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle d'Auvergne* 1925, n° 7, p. 26 et n° 8, p. 49. *Le bassin hydrominéral et thermal de Saint-Nectaire.*

L'eau sollicitée de la profondeur vers la surface s'engage, à la montée, d'abord par les failles, puis se divise par toutes les fissures et dans tous les sens grâce aux diaclases ; la température étant fonction du chemin parcouru, il résulte, pour ces dernières, un abaissement rapide de leur température et le dépôt plus rapide des éléments minéraux. C'est pourquoi on trouve des quantités de diaclases obturées par de l'aragonite, des travertins et de la silice à l'état de résinite enfermant des tiges de prêles et souvent colorée en jaune brillant par de l'orpiment.

Toute la région sud-ouest du département depuis la vallée de la Veyre, est divisée en compartiments jusqu'au Mont-Dore qui en masque certainement d'autres ; c'est la partie la plus brisée de ce territoire et partant la plus riche en eaux minérales.

En parcourant le sud du Puy-de-Dôme dans ces régions des nappes basaltiques du Cézalier confinant au Cantal, on rencontre encore des sources minérales plus clairsemées et il est difficile de connaître exactement leur point d'émergence qui semble à première vue sortir du basalte des plateaux, chose aussi invraisemblable que de supposer qu'elles sortent des basaltes plus récents.

Il est probable que les sources qui sourdent des basaltes des environs de Besse, à Besse même, à Compains, à Montsineyre, à Egliseneuve-d'Entraigues et à Picherande, sont d'origine gneissique, mais elles s'échappent à travers des fissures ou des projections de basalte.

A côté de ces sources, on en voit d'autres, telles que celles de Vouassières, du Valbelex, d'Egliseneuve-d'Entraigues, etc., qui sortent du gneiss et ne sont que

faiblement radioactives comme les premières. Et il en est de même de celles qui sortent des roches éboulées au sud du Mont-Dore au-dessus de Picherande, où les érosions glaciaires ont le plus sévi.

Il doit être fait exception à Saint-Donat pour la source radioactive du hameau du Sac, qui sort des granites et paraît être sur une faille passant par quatre petits dykes basaltiques en ligne avec la source.

En suivant la périphérie du Mont-Dore, on ne trouve rien de remarquable au point de vue qui nous occupe ; nous arrivons aux eaux de La Bourboule et du Mont-Dore.

La source radioactive Choussy (La Bourboule) s'échappait jadis du pied de la falaise granitique. Le Dr Choussy fit effectuer un sondage qui se termina au granite et traversa la faille de La Bourboule. Ce sondage a traversé tout d'abord un tuf trachytique bleu, puis des niveaux argileux, enfin des arènes granitiques et a percé le granite vers 60 mètres ; le sondage a été poussé à 84 mètres. Les cendres trachytiques de la dernière période du Mont-Dore s'appuient contre la paroi de la faille par un miroir de glissement toujours très visible et il semble que cette faille a rejoué au Pliocène supérieur, ce qui donnerait une explication de la radioactivité de l'eau Choussy mise par ce mouvement directement en rapport avec les émanations magmatiques de profondeur.

Les forages de captage des sources Fenestre ont été poussés à 34 mètres (source n° 1 en aval) et vers 161 mètres (source n° 2). Ce dernier forage s'est achevé dans les tufs quartzeux granités (158 à 161 mètres), aussi la radioactivité de ces sources n'est nullement comparable à celle de la source Choussy.

En remontant le cours de la Dordogne, on trouve la source de Croizat jaillissant d'un dyke de rhyolite gris-verdâtre, dans les cinérites à projections. Elle semble en rapport avec la faille indiquée par Michel-Lévy entre le massif du Sancy et celui du puy Gros, faille intéressant également les sources Gabriel et Félix.

Les sources qui alimentent les bains du Mont-Dore sortent au contact d'un dyke de phonolite et à proximité d'un dyke très mince de labradorite augitique.

Vers le pied du Sancy, dans le ravin d'Enfer, une source sourd au contact d'un dyke trachytique. Les sources de la vallée de Chaudefour doivent leur existence à ces dykes si nombreux qui sillonnent les flancs des ruines du Sancy, en particulier, à la source Sainte-Anne, la seule exploitée, le dyke trachytique est à trois mètres de son captage.

Le massif entier du Mont-Dore donne donc naissance à des sources thermales et minérales d'origine filonienne, seulement il y a une distinction à faire entre les sources arsénicales et celles simplement sodiques ; les sources arsénicales doivent être en rapport, sous les projections et laves du Mont-Dore, avec des filons de mispickel. On trouve surtout dans la partie nord de la couronne du volcan trachytique de nombreux filons de mispickel se dirigeant vers l'axe du Sancy ; il est possible que quelques-uns de ces filons soient recoupés par des dykes trachytiques favorisant la sortie des eaux minérales (1).

Les régions plus à l'ouest et nord-ouest du Mont-

(1) La source de Saint-Donat, au sud de La Bourboule, est signalée par Lecoq comme source arsénicale (*Les eaux minérales du Massif central de la France*).

Dore sont aussi filoniennes et presque dépourvues de sources minérales ; celles que l'on rencontre ne sont pas arsénicales à notre connaissance, pas plus que celles de Pontgibaud.

Sans quitter les régions volcaniques, nous trouvons des sources minérales autour de la chaîne des Puys, mais n'offrant pas de particularités intéressantes.

N° d'ordre	Désignation des sources	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Émission du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'énergie
<i>Châteauneuf</i>							
70	Laplace	3 juillet 1926	4,2	18°0	$4,45 \times 10^{-3}$	1,5	Les sources de Châteauneuf sortent d'un massif de granulite ayant traversé le granite et au contact d'une grande faille limitant un compartiment effondré de tufs orthopyriques, dont l'ensemble de ce terrain est sillonné de filons de microgranulite de quartz dont certains sont pourvus de galène très argentineuse. La relation des sources et des filons a été rendue évidente au cours de travaux d'exploitation de ces filons.
71	Chambon-Lagaranne	—	2,5	16°0	$2,77 \times 10^{-3}$	0,2	
72	Buvette (Chambon-Lagaranne	—	7,2	18°3	$2,58 \times 10^{-3}$	1,7	
73	Adam n° 1	—	8,3	15°6	$2,84 \times 10^{-3}$	0,9	
74	— 2	—	0,7	14°8	$2,70 \times 10^{-3}$	0,9	
75	De la Rotonde	—	Non mesuré	27°8	$2,69 \times 10^{-3}$	0,7	
76	Chevarier	—	12,7	31°2	$2,77 \times 10^{-3}$	1,0	
77	Du Petit-Rocher	—	Non mesuré	32°0	$3,13 \times 10^{-3}$	1,4	
78	Marie-Louise	6 juillet 1926	—	32°6	$3,13 \times 10^{-3}$	1,2	
79	Buvette du Petit-Rocher	—	1,8	24°0	$2,91 \times 10^{-3}$	2,8	
80	Du Grand-Rocher	—	5,4	13°7	$3,62 \times 10^{-3}$	3,0	
81	Desaix	—	0,9	13°2	$3,47 \times 10^{-3}$	5,3	
82	Clénence	—	0,7	13°0	$3,82 \times 10^{-3}$	0,9	
83	Marguerite	—	1,8	10°0	$2,48 \times 10^{-3}$	1,2	
84	Bain tempéré	—	Non mesuré	33°2	$3,76 \times 10^{-3}$	0,3	
85	Grand Bain chaud	—	—	33°2	$3,92 \times 10^{-3}$	1,9	
86	César	—	—	23°7	$3,92 \times 10^{-3}$	1,0	
87	Julie	6 juillet 1926	—	29°0	$3,82 \times 10^{-3}$	3,9	
88	Buvette de la Pyramide	—	0,3	22°8	$3,79 \times 10^{-3}$	1,7	
89	Le Pré	—	4,1	17°1	$2,29 \times 10^{-3}$	1,4	
90	Lefort	—	33°1	33°1	$3,73 \times 10^{-3}$	0,3	
91	Du Pavillon	—	25,0	14°8	$4,27 \times 10^{-3}$	1,8	
92	Du Petit-Moulin n° 1	—	2,7	16°0	$4,03 \times 10^{-3}$	0,2	
93	— 2	—	1,2	13°1	$3,13 \times 10^{-3}$	2,1	
94	Saint-Cyr	5 novembre 1926	2,5	9°9	$2,96 \times 10^{-3}$	1,7	

N° d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Émission du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
95	<i>Biollet</i> De Biollet	0°22'3	45°59'5	27 juin 1926	3,0	12°0	$0,90 \times 10^{-3}$	0,8	Filon de quartz dans granite.
96	<i>Saint-Priest-des-Champs</i> Du Colis R.G. n° 1	0°25'3	45°58'6	30 juin 1926	Non mesuré	12°0	$1,31 \times 10^{-4}$	0,1	Cette région granitique est traversée au-dessous de Buffévant par un filon de quartz NNE-SSW, recoupé en son milieu par le vallon du Colis. Les sources minérales sourdent en aval de ce filon à la faveur de nombreux diaclases des roches.
97	— 2	0°25'2	45°58'5	—	—	12°2	$2,01 \times 10^{-4}$	0,7	
98	— 3	0°25'2	45°58'7	—	—	9°7	$1,48 \times 10^{-4}$	2,9	
99	— 4	0°25'2	45°58'7	—	—	11°3	$2,32 \times 10^{-4}$	1,4	
100	— 5	0°25'2	45°58'7	—	—	10°4	$2,78 \times 10^{-4}$	0,2	
101	Fontaine du Chemin	0°25'3	45°58'4	—	2,2	10°0	$1,31 \times 10^{-4}$	5,5	
102	Source Maniol	0°25'3	45°58'4	—	Non mesuré	11°4	$3,60 \times 10^{-4}$	0,05	
103	<i>Saint-Georges-de-Mons</i> De Mouly	0°32'9	45°56'1	29 avril 1926	4,5	10°6	$1,10 \times 10^{-3}$	0,8	Émergent à la faveur de filons de microgranulite et quartz et d'apophyses granitiques.
104	De Champelhost	0°33'4	45°55'8	—	5,2	15°0	$1,05 \times 10^{-3}$	1,4	
105	<i>Saint-Angel</i> De Montoute (Marie-Laure) ..	0°37'4	45°59'4	—	9,0	19°3	$3,27 \times 10^{-3}$	2,3	
106	<i>Manzat</i> De la Coussetière	0°37'9	45°58'7	—	2,8	11°0	$3,05 \times 10^{-3}$	2,9	
107	<i>Montcal</i> De Laschamps	0°45'1	45°0'7	2 mai 1926	Non mesuré	14°1	$2,68 \times 10^{-3}$	1,1	Argiles gréseuses stampiennes.
108	<i>Jozeland</i> Du moulin de Barbe	0°45'7	45°0'5	—	2,0	11,2	$2,45 \times 10^{-3}$	1,9	Au contact des argiles stampiennes et des alluvions.

N° d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Emanation du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence	
<i>Artois</i>										
109	De Vilemorgé	0°45'9"	46°0'0"	3 mai 1926	3,1	11°4	$2,48 \times 10^{-3}$	0,7	Alluvions quaternaires. Ces sources sont situées dans un espace restreint — lambeau de granite entouré de marnes stampiennes au S., au N. et à l'W. de schistes précambriens. Les granites et schistes sont sillonnés de filons de microgranulite et de quartz et limités de la Limagne par de failles.	
110	Gros	0°48'1"	45°59'8"	—	0,6	13°4	$3,10 \times 10^{-3}$	1,9		
111	Alphonse	0°48'1"	45°59'8"	—	2,0	12°9	$3,21 \times 10^{-3}$	1,0		
112	Fradet	0°48'1"	45°59'8"	—	1,1	9°0	$3,00 \times 10^{-3}$	0,2		
<i>Saint-Myon</i>										
113	Desaix	0°48'1"	45°59'7"	8 mai 1926	1,5	12°9	$3,78 \times 10^{-3}$	2,0	Dans le granite au contact de filons de granulite et de quartz plombogéométrique.	
114	Le Communal	0°48'1"	45°59'7"	—	1,3	12°0	$3,27 \times 10^{-3}$	1,2		
115	Jatteux	0°48'1"	45°59'7"	—	1,3	12°6	$3,35 \times 10^{-3}$	1,6		
116	Rigaud-Bresson	0°48'1"	45°59'7"	—	1,5	12°9	$3,27 \times 10^{-3}$	1,8		
117	Fayard n° 1	0°48'1"	45°59'7"	—	1,5	12°8	$3,27 \times 10^{-3}$	0,9		
118	— 2	0°48'1"	45°59'7"	—	5,0	11°9	$2,88 \times 10^{-3}$	2,8		
119	De Combe-Grand	0°44'3"	45°58'9"	—	6,6	11,9	$0,59 \times 10^{-3}$	0,7	Émergent dans un compartiment de granite surélevé formant limite de la Limagne.	
<i>Beauregard-Vendon</i>										
120	Des Vignes	0°45'5"	45°57'5"	11 mai 1926	12,0	19°7	$2,98 \times 10^{-3}$	2,8		
121	Grand-Puits	0°45'5"	45°57'5"	—	200,0	27°0	$3,12 \times 10^{-3}$	1,6		
122	Du Chemin	0°45'5"	45°57'5"	—	2,9	15°5	$1,87 \times 10^{-3}$	2,5		
<i>Prompsat</i>										
123	Chanteloze	0°44'7"	45°57'0"	—	4,0	14°1	$2,80 \times 10^{-3}$	3,1	Jalonnent l'une des failles de la Limagne qui sépare le granite d'un compartiment tertiaire.	
124	Debord	0°44'7"	45°56'9"	—	11,0	16°0	$3,00 \times 10^{-3}$	5,6		
<i>Génacoux</i>										
125	Grande source de l'Etablissement	0°45'2"	45°56'9"	—	Non mesuré	23°8	$3,73 \times 10^{-3}$	0,5		
126	Du Ceix	0°45'5"	45°57'6"	—	—	23°6	$3,73 \times 10^{-3}$	0,8		

N° d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Émanation du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et flons d'émergence
<i>Gévaux (suit)</i>									
127	Des Vignes	0°45'2	45°57'0	11 mai 1925	Non mesuré	24°0	$3,73 \times 10^{-3}$	0,6	Jalonnent l'une des failles de la Limagne qui sépare le granite d'un compartiment tertiaire.
128	Du Ruisseau n° 1	0°45'0	45°56'9	—	8,0	19°0	$3,73 \times 10^{-3}$	0,4	
129	— 2	0°45'2	45°56'8	—	Non mesuré	19°1	$3,73 \times 10^{-3}$	2,4	
130	— 3	0°45'2	45°56'8	—	2,0	18°9	$3,73 \times 10^{-3}$	1,9	
131	Du Chemin	0°45'4	45°56'9	—	3,0	16°0	$3,73 \times 10^{-3}$	0,6	
<i>Loubeignat</i>									
132	Georget	0°42'9	45°54'8	—	2,8	15°0	$3,70 \times 10^{-3}$	0,5	Émergent du granite au contact d'un flon de quartz calcaireux.
133	Galathée	0°42'9	45°54'8	—	1,6	15°1	$3,80 \times 10^{-3}$	0,4	
134	Jouvence	0°42'8	45°54'7	—	7,0	15°0	$3,60 \times 10^{-3}$	0,3	

N° d'ordre	Désignation des sources	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Émission du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
135	Deval	19 avril 1928	8,8	24°3	$7,07 \times 10^{-3}$	2,7	Au contact des terrains granitiques et des argiles et arkoses du longrien sur le traît d'une faille intéressant le tertiaire.
136	Gubler n° 2	—	Non mesuré	32°2	$7,07 \times 10^{-3}$	1,7	
137	Marquerite	—	58,0	33°0	$5,16 \times 10^{-3}$	0,5	
138	Gubler n° 4	—	4,7	31°7	$7,07 \times 10^{-3}$	0,3	
139	— 5	—	54,0	36°9	$7,07 \times 10^{-3}$	0,3	
140	Yvonne	—	60,0	37°0	$7,07 \times 10^{-3}$	1,0	
141	Suzanne	—	Non mesuré	35°0	$7,07 \times 10^{-3}$	0,4	
142	Gubler n° 6	—	Non mesuré (fort)	35°0	$7,07 \times 10^{-3}$	traces	
143	Du Paysan	—	(moyen)	14°5	$5,16 \times 10^{-3}$	0,4	
144	Habert	—	Non mesuré	32°8	$4,12 \times 10^{-3}$	0,1	
145	Mathivat	—	12,0	33°0	$4,32 \times 10^{-3}$	0,4	
146	Rochette	—	3,0	27°0	$3,63 \times 10^{-3}$	0,1	
	Châtelainguyon						

No d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Emanation du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
147	<i>Pontaur</i>								
148	De Pontaur n° 1	0°21'5	45°52'6	20 mai 1926	6,2	10°2	$0,95 \times 10^{-3}$	3,3	Micaschiste très chargé en biotite traversé par filons de pegmatites.
149	— 2	0°21'6	45°52'5	—	4,3	10°6	$0,46 \times 10^{-3}$	3,2	
150	— 3	0°21'7	45°52'3	—	2,5	10°5	$0,68 \times 10^{-3}$	2,3	Micaschiste très chargé en biotite traversé par filons de granulite.
151	— 4	0°21'8	45°52'3	—	3,1	10°3	$0,64 \times 10^{-3}$	1,8	
151	— 5	0°22'0	45°52'1	—	2,9	10°1	$0,32 \times 10^{-3}$	0,9	Micaschiste.
152	<i>Montermy</i>								
152	De Montermy	0°30'0	45°52'5	24 mai 1926	4,0	12°3	$0,66 \times 10^{-3}$	1,3	Sourd dans le gneiss granitique au contact d'un filon de granulite.
153	<i>Bromont-Lamotte</i>								
153	De Chalusset	0°29'4	45°52'1	—	5,0	18°9	$1,12 \times 10^{-3}$	1,4	Emergé d'une fissure de la lave du volcan de Chalusset et provient du gneiss sous-jacent.
154	De Javelle	0°30'4	45°50'6	—	Non mesuré (fort)	12°0	$1,22 \times 10^{-3}$	0,9	Dans le gneiss granitique sur le trajet d'un filon de granulite.
155	<i>Chapdes-Beaufort</i>								
155	De Châteaufort	0°30'9	45°51'5	—	2,0	9°8	$2,00 \times 10^{-3}$	0,6	Gneiss granitique et filon de granulite.
156	De Barbecot n° 1	0°30'8	45°51'9	—	3,1	9°6	$0,54 \times 10^{-3}$	0,9	Emergent dans le gneiss granitique à la faveur d'un long filon de quartz à galène argentifère.
157	— 2	0°30'7	45°51'9	—	2,2	9°5	$0,61 \times 10^{-3}$	0,8	
158	De Pulvérière n° 1	0°33'7	45°53'0	28 mai 1926	Non mesuré (fort)	10°8	$0,84 \times 10^{-3}$	2,8	Au croisement d'un filon de quartz à mispickel et d'un filon de micro-granulite.
159	— 2	0°33'7	45°53'0	—		10°6	$0,93 \times 10^{-3}$	2,6	
160	<i>Saint-Ours</i>								
160	Descottes	0°31'7	45°51'7	28 mai 1926	3,0	10°0	$0,70 \times 10^{-3}$	1,0	Gneiss et filon de granulite à deux micas.
161	De la Fronde	0°32'2	45°51'1	—	Non mesuré (fort)	11°7	$1,66 \times 10^{-3}$	1,2	Gneiss granitique et filon de micro-granulite.
162	<i>Nohant</i>								
162	Font-Saïade	0°41'2	45°49'8	—	5,0	10°8	$4,20 \times 10^{-3}$	1,0	Granite à pinite.

No d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Emanation du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et flots d'émergence
163	<i>Royat-Chamalières</i> (1)								
164	Eugénie			2 mars 1925	380,0	33°4	$4,29 \times 10^{-3}$	0,4	
165	César			—	25,0	27°2	$2,68 \times 10^{-3}$	0,4	
166	Velleda			—	170,0	8°0	$0,26 \times 10^{-3}$	0,6	
167	Saint-Mart			—	50,0	28°8	$4,83 \times 10^{-3}$	14,3	
168	Saint-Victor			—	138,0	21°2	$4,65 \times 10^{-3}$	15,6	
169	Du Viaduc			—	Non mesuré		$3,88 \times 10^{-3}$	4,2	
170	Fontex			7 mars 1925	6,0	12°8	$4,48 \times 10^{-3}$	23,2	
171	Marie-Louise			—	2,0	17°3	$4,58 \times 10^{-3}$	2,0	
171	Des Roches			—	60,0	17°0	$3,20 \times 10^{-3}$	0,2	
172	<i>Chanoual</i> De Fontrouge	0°44'3	45°41'7	12 mars 1925	2,6	13°7	$1,12 \times 10^{-3}$	3,4	
173	De la Bâisse	0°44'9	45°41'7	—	1,1	13°0	$0,69 \times 10^{-3}$	4,1	
174	<i>Le Vernet-Sainte-Marguerite</i> De Sainte-Marguerite	0°37'3	45°36'6	1 ^{er} juin 1926	Non mesuré (moyen)	10°0	$0,38 \times 10^{-3}$	4,1	
175	<i>de Bourg-Lastic</i> Du Village de Corne	0°13'3	45°40'2	11 juin 1926	18,0	12°0	$3,08 \times 10^{-3}$	2,6	
176	<i>Ceyssat</i> Focker	0°33'5	45°46'0	1 ^{er} juin 1926	11,8	10°7	$0,88 \times 10^{-3}$	2,4	
177	Du Ruisseau	0°33'4	45°45'7	—	4,2	11°0	$0,75 \times 10^{-3}$	1,9	

(1) Les résultats obtenus pour les sources de l'Etablissement thermal de Royat sont très voisins de ceux obtenus par A. Lepage en 1922 : Eugénie 0,40 ; César 0,37 ; Velleda 0,88 ; Saint-Mart 14,5 ; Saint-Victor 15,35. Nous avons effectué à plusieurs reprises des jaugages qui nous ont donné un débit constant.

No d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Émanation du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et fions d'émergence
178	<i>Nebouzat</i> De Pont-des-Eaux	0°32'5	45°43'0	1 ^{er} juin 1926	5,2	12°7	$1,92 \times 10^{-3}$	0,8	Schistes précambriens. Schistes précambriens au voisinage du granite.
179	De la Gorce	0°33'6	45°42'4	—	7,0	12°6	$2,02 \times 10^{-3}$	0,7	
180	<i>Aurères</i> De Font-Salade	0°33'4	45°41'1	—	3,2	11°2	$0,78 \times 10^{-3}$	3,0	Au contact des schistes précambriens et du granite.
181	Non salée	0°33'4	45°41'0	—	Non mesuré	10°0	$0,36 \times 10^{-3}$	0,8	
182	<i>Rochefort</i> Du Vieux Pont chez Verdier ..	0°27'5	45°41'2	11 juin 1926	2,0	10°0	$0,20 \times 10^{-3}$	0,9	Schistes précambriens. Trachyte.
183	Font-Salade	0°27'8	45°38'3	—	1,6	8°9	$0,23 \times 10^{-3}$	1,4	

N° d'ordre	Désignation des sources	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Émission du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et flots d'émergence
184	Puits Choussy	18 juillet 1926	400,0	54°8	$6,40 \times 10^{-3}$	20,7 (1)	Naît par sondage au contact du miroir de faille du granite et de sa pyrrite inférieure.
185	Fenêtre n° 1	—	98,0	18°1	$0,56 \times 10^{-3}$	0,7	Le sondage traverse les cinérites de projections de la première période éruptive du Mont-Dore et s'arrête à la surface du granite effondré.
186	— 2	—	39,0	16°1	$0,64 \times 10^{-3}$	0,8	
187	Clémence	—	12,0	12°0	$6,40 \times 10^{-3}$	1,6	
188	Henry	—	1,1	10°0	$0,91 \times 10^{-3}$	2,4	
189	Croizat	—	150,0	39°9	$7,81 \times 10^{-3}$	0,6	Dans les cinérites de projections. (*)
190	Félix	22 avril 1927	12,0	32°0	$5,60 \times 10^{-3}$	1,0	Dans les trufs à projections sillonnées de flots de trachyte, de labradorite et de phonolite.
191	Gabriel	—	Non mesuré	14°9	$5,50 \times 10^{-3}$	0,8	
192	Monneyron	11 juin 1926	4,0	11°9	$4,20 \times 10^{-3}$	3,8	
193	Le Panthéon	—	11,5	35°5	$1,79 \times 10^{-3}$	1,0	
194	Chazera	—	19,8	39°8	$1,68 \times 10^{-3}$	0,2	Les sources de l'établissement du Mont-Dore naissent au pied de la montagne de l'Angle, au contact d'un filon de phonolite, découvert par Michel-Lévy et intrusif dans les cinérites à projections trachytiques.
195	Madeleine	—	26,0	44°5	$1,75 \times 10^{-3}$	0,1	
196	Boyer	—	4,6	43°0	$1,78 \times 10^{-3}$	1,7	
197	César	—	56,3	41°8	$1,74 \times 10^{-3}$	0,9	
198	Caroline	—	19,3	40°0	$1,75 \times 10^{-3}$	0,1	
199	Saint-Jean	27 avril 1927	19,3	41°5	$1,77 \times 10^{-3}$	0,8	
200	Pigeon	—	5,5	39°8	$1,78 \times 10^{-3}$	0,2	
201	Ramond	—	4,6	40°5	$1,87 \times 10^{-3}$	0,9	
202	Rigny	—	20,0	40°7	$1,75 \times 10^{-3}$	0,3	
203	Pasteur	—	79,3	43°5	$1,78 \times 10^{-3}$	0,7	
204	Bardon	—	1,0	89°0	$0,10 \times 10^{-3}$	2,0	
205	Marguerite	—	0,8	69°9	$0,31 \times 10^{-3}$	1,5	
206	Des Enfers	—	0,9	72°2	$0,27 \times 10^{-3}$	1,3	
207	Des Egravats	—					

(1) Le résultat est très voisin de ceux obtenus par A. Laborde en 1908 : 22,45 et A. Lepape en 1913 : 20,5.

(*) Sort au contact d'un dyke de rhyolite que la galerie de captage a découvert sous les cinérites à blocs de projections du Mont-Dore.

No d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Émanation du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
208	De Casadoigne.....	0°30'0	45°32'1	19 juin 1926	Non mesuré	7°0	$0,27 \times 10^{-3}$	3,0	Nait au pied de la coulée d'andésite de Casadoigne et au contact d'un petit filon d'andésite à sandine dans les cinérites à projections.
209	De la Cascade	0°30'1	45°31'5	—	—	7°2	$0,31 \times 10^{-3}$	3,5	Sort des tufs cinéritiques au-dessous de la coulée basaltique formant la chute de la cascade.
210	Chaudefour n° 1.....	0°30'8	45°32'0	—	4,6	12°0	$0,40 \times 10^{-3}$	0,5	Sortent d'une cassure formant le lit du ruisseau dans les tufs à projections ou les alluvions torrentielles du ruisseau.
211	— 2.....	0°30'7	45°32'0	—	5,3	12°9	$0,31 \times 10^{-3}$	0,7	
212	Face à l'hôtel	0°30'6	45°32'0	—	non mesuré (été)	11°0	$0,38 \times 10^{-3}$	0,6	
213	Petit Griffon	0°30'5	45°32'1	—	3,8	18°0	$0,18 \times 10^{-3}$	0,7	
214	Supérieure	0°30'7	45°32'1	—	4,0	26°3	$0,32 \times 10^{-3}$	0,3	
215	Inférieure	0°30'7	45°32'2	—	20,9 (été)	23°0	$1,03 \times 10^{-3}$	0,5	Nait dans un filon de trachyte à sandine.
216	Vergétorix	0°30'8	45°32'2	—	20,9	11°3	$0,27 \times 10^{-3}$	0,2	
217	Sainte-Aune.....	0°30'8	45°32'2	—	2,5	11°0	$0,34 \times 10^{-3}$	1,4	Sort du granite normal à proximité d'un filon de quartz plomboux.
218	Font-Pique	0°32'8	45°33'3	23 juin 1926	4,0	11°6	$0,31 \times 10^{-3}$	1,7	Sort du granite normal au voisinage d'un filon de granulite et d'un dyke de basalte.
219	Vouassière n° 1	0°32'9	45°33'7	—	6,0	13°0	$1,79 \times 10^{-3}$	1,7	Projections trachytiques du col de Diane.
220	— 2	0°32'9	45°33'7	—	1,8	12°8	$1,70 \times 10^{-3}$	1,2	
221	Fontaine de la Garde	0°33'4	45°35'0	—	non mesuré (été)	10°0	$0,06 \times 10^{-3}$	2,8	Granite.
222	Font-Salade n° 1	0°24'9	45°30'7	2 mai 1927	1,5	10°5	$0,90 \times 10^{-3}$	5,5	
223	— 2	0°24'7	45°30'7	—	2,3	10°3	$0,88 \times 10^{-3}$	4,9	Projections trachytiques.
224	Charles	0°27'8	45°31'1	—	3,2	9°0	$0,87 \times 10^{-3}$	0,1	
225	Maillet	0°27'8	45°31'2	—	2,6	9°3	$0,75 \times 10^{-3}$	0,1	
226	Aimé	0°28'2	45°31'4	—	2,9	8°4	$0,54 \times 10^{-3}$	0,2	
227	Saint-Donald Du Hameau du Sac	0°22'8	45°28'8	6 mai 1927	Non mesuré (moyen)	9°6	$1,61 \times 10^{-3}$	8,4	Sur une fracture NS, qui s'aligne par 3 petits dykes basaltiques au voisinage d'un filon de granulite.

N° d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Emission du radium en millilitre par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
228	<i>Picherandé</i>	0°28'1	45°29'7	6 mai 1927	2,6	10°4	$0,54 \times 10^{-3}$	3,6	Sort des fissures des basaltes des plateaux recouvrant le gneiss.
229	De la rive gauche	0°28'3	45°29'7	—	1,0	10°3	$0,66 \times 10^{-3}$	4,0	
230	De Charrère	0°28'6	45°30'1	—	3,6	10°8	$0,66 \times 10^{-3}$	4,0	
231	Fontaine du Communal	0°28'9	45°30'2	—	2,9	10°4	$0,19 \times 10^{-3}$	2,5	
232	De Chomel	0°27'7	45°27'7	—	10,0	11°6	$1,74 \times 10^{-3}$	2,4	
233	<i>Epliseneuve-d'Entraigues</i>	0°28'9	45°24'4	23 juillet 1926	2,6	10°0	$0,32 \times 10^{-3}$	2,0	Emerge d'un filon de granulite dans le micaschiste très kaolinisé gneiss.
234	Du Chemin Saint-Geuds	0°28'9	45°24'7	—	2,9	11°0	$1,00 \times 10^{-3}$	0,6	
235	Font-Sainte	0°28'8	45°23'6	—	0,7	11°8	$2,44 \times 10^{-3}$	0,7	
236	Bogon	0°29'3	45°23'8	—	0,7	12°0	$2,00 \times 10^{-3}$	0,6	
237	De Suquetoux n° 1	0°30'7	45°26'2	24 juillet 1926	2,8	11°0	$1,26 \times 10^{-3}$	1,4	
238	— 2	0°30'7	45°26'2	—	3,1	11°4	$0,84 \times 10^{-3}$	1,5	Sortent des basaltes des plateaux qui recouvrent le gneiss.
239	<i>Compains</i>	0°33'9	45°28'1	31 juillet 1926	Non mesuré	7°5	$0,25 \times 10^{-3}$	0,5	Emerge de fissures de la coulée de Montchal étalée sur le basalte des plateaux, lequel recouvre le gneiss.
240	De Chamliane	0°33'6	45°28'0	—	2,6	7°9	$0,31 \times 10^{-3}$	0,8	
241	Du ravin de Montsinèvre n° 1	0°33'9	45°27'9	—	2,1	8°0	$0,22 \times 10^{-3}$	0,5	
242	Rachèle	0°34'2	45°27'8	—	1,6	8°1	$0,31 \times 10^{-3}$	0,4	
243	Moulinon n° 1	0°35'8	45°26'6	—	4,0	9°0	$1,97 \times 10^{-3}$	1,0	Sur les bords de la coulée basaltique de Montsinèvre qui recouvre le gneiss et au voisinage d'un gros dyke de phonolite.
244	— 2	0°35'6	45°26'4	—	2,8	9°1	$1,68 \times 10^{-3}$	1,1	
245	<i>Valbeix</i>	0°33'9	45°27'8	—	4,0	10°0	$0,40 \times 10^{-3}$	1,0	Gneiss.

N° d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Emanation du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et flons d'émergence
246	<i>Bessé</i> Du Pont-Scaot n° 1	0°31'6"	45°28'9"	3 août 1926	Non mesuré	19°5	$0,03 \times 10^{-3}$	traces	Au contact de l'andésite, du basalte de Montchal et du basalte des plateaux (gneiss sous-jacent).
247		0°31'4"	45°28'1"	—	—	11°0	$0,21 \times 10^{-3}$	—	
248	Du lac Pavin	0°32'9"	45°30'0"	—	1,6	10°0	$0,17 \times 10^{-3}$	0,3	Au contact de la lave de Montchal et du basalte des plateaux qui recouvre les gneiss.
249	Des Rochers de Berthaire	0°34'1"	45°30'5"	—	4,0	9°6	$0,64 \times 10^{-3}$	0,3	Sort de la lave de Montchal qui recouvre le gneiss.
250	Thérèse	0°34'0"	45°30'7"	—	3,1	9°4	$0,40 \times 10^{-3}$	0,9	Sort du gneiss au contact d'une coulée d'andésite.
251	Villefour	0°35'2"	45°30'6"	—	3,6	9°6	$0,75 \times 10^{-3}$	0,6	Sort de la lave de Montchal qui recouvre le gneiss.
252	<i>Murols</i> Du Pont des Marais	0°35'9"	45°34'6"	23 juin 1926	2,0	13°0	$1,67 \times 10^{-3}$	1,1	Nait dans les cinérites de Murols sur une ligne NS, jalonnée par un dyke de basalte intrusif, le cratère de l'artaret et un autre point basaltique en prolongement d'une faille.
253	<i>Saint-Vidor</i> De Jassat	0°35'1"	45°33'1"	—	2,6	12°8	$1,93 \times 10^{-3}$	1,2	Granite.
254	<i>Saint-Diéry</i> De la Bonnette	0°40'9"	45°32'0"	27 juin 1926	4,0	11°3	$2,51 \times 10^{-3}$	0,5	Sortent du gneiss au bord de la coulée de lave de Montchal.
255		0°41'6"	45°31'9"	—	120,0	12°6	$2,02 \times 10^{-3}$	0,7	

N° d'ordre	Désignation des sources	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Emission du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
	<i>Saint-Nectaire (1)</i>						
256	Bleue	27 décembre 1927	10,6	29°2	$6,89 \times 10^{-3}$	0,5	
257	Coculle	—	4,8	18°0	$6,30 \times 10^{-3}$	0,5	
258	Gros Bouillon	—	100,0	35°2	$6,60 \times 10^{-3}$	0,2	
259	Berger	—	3,0	15°0	$5,67 \times 10^{-3}$	0,8	Diaclases granitiques.
260	Pauline	—	11,0	24°5	$6,49 \times 10^{-3}$	0,3	
261	Boëtte	—	21,8	31°0	$7,00 \times 10^{-3}$	0,3	
262	Saint-Céaire	—	6,8	33°7	$7,10 \times 10^{-3}$	0,2	
263	Des Dames	—	0,3	11°8	$6,60 \times 10^{-3}$	1,6	
264	Du Dolmen	—	Non mesuré moyen	9°8	$3,09 \times 10^{-3}$	0,5	Deux groupes de diaclases, certaines fractures NW. sont des failles de décrochement.
265	Rouge	—	5,0	20°0	$6,60 \times 10^{-3}$	0,6	
266	De la Voûte. Entrée	—	2,1	22°0	$7,81 \times 10^{-3}$	0,9	
267	— — — — —	—	5,0	18°0	$7,46 \times 10^{-3}$	traces	Diaclases granitiques.
268	Gubier. Fond	2 janvier 1928	6,0	35°0	$7,46 \times 10^{-3}$	2,8	
269	— à droite	—	1,0	32°0	$7,46 \times 10^{-3}$	6,3	
270	— à gauche	—	5,0	35°0	$7,46 \times 10^{-3}$	3,5	
271	Du Parc	—	2,7	22°3	$7,26 \times 10^{-3}$	0,5	Émerge au croisement de 2 fractures, l'une étant la faille du Mont-Cornadore.
272	Petite source rouge	—	11,1	19°9	$6,10 \times 10^{-3}$	1,4	Au point de convergence de deux diaclases.
273	Intermittente	—	Non mesuré faible	19°4	$6,31 \times 10^{-3}$	0,9	
274	Des Garçons	—	1,3	31°0	$5,37 \times 10^{-3}$	0,6	
275	Des Grottes du Mont-Cornadore (entrée)	—	10,0	22°0	$6,85 \times 10^{-3}$	0,8	Granite.
276	— (fond de la galerie gauche)	—	Non mesuré	22°0	$6,89 \times 10^{-3}$	4,2	
277	— (galerie droite)	—	—	15°0	$7,26 \times 10^{-3}$	4,8	
278	Du Mont-Cornadore	—	16,0	37°0	$6,27 \times 10^{-3}$	0,2	Granite (diaclase).
279	Du Rocher	—	2,0	25°0	$7,26 \times 10^{-3}$	0,5	

(1) Les résultats sont très voisins de ceux obtenus par A. Lepape en 1913; S. Gros-Bouillon 0,14; S. Bette et Saint-Céaire, traces; S. Rouge 0,54; S. du Parc 0,42; S. Papon n° 1, 0,34.

N° d'ordre	Désignation des sources	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 19°	Emanation du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
	<i>Saint-Nectaire (suite)</i>						
280	Morange	2 janvier 1928	Non mesuré	14°2	$6,30 \times 10^{-3}$	0,3	Failles ou diaclases sensiblement NS.
281	Beudoux	22 décembre 1927	(moyen)	22°3	$6,65 \times 10^{-3}$	1,3	
282	De la Vallée	—	—	22°0	$6,65 \times 10^{-3}$	1,3	
283	Renée	—	2,1	13°0	$6,68 \times 10^{-3}$	0,7	
284	Andrée	—	1,5	14°4	$5,16 \times 10^{-3}$	traces	Diaclases granitiques.
285	Brauer	—	0,6	12°0	$5,84 \times 10^{-3}$	0,4	
286	Maire	—	0,4	12°2	$5,84 \times 10^{-3}$	traces	
287	Léon	—	10,0	28°0	$7,26 \times 10^{-3}$	0,1	
288	Eulalie	—	18,0	27°0	$7,63 \times 10^{-3}$	0,3	Faille ouverte NS. au fond d'une galerie.
289	Edmond	—	66,0	32°0	$7,26 \times 10^{-3}$	0,1	
290	Madeleine	—	18,0	53°0	$7,67 \times 10^{-3}$	0,5	Granite faillé et très diaclaté.
291	Michel	—	30,0	52°0	$7,67 \times 10^{-3}$	0,7	
292	Anna	—	6,0	44°0	$7,63 \times 10^{-3}$	0,3	
293	Hyacinthe	—	6,0	42°0	$7,55 \times 10^{-3}$	0,4	
294	Georges	—	4,0	40°0	$7,40 \times 10^{-3}$	0,5	Faille NS. Faille.
295	(Galerie supérieure) du Toit	—	2,6	15°0	$6,00 \times 10^{-3}$	1,5	
296	Du fond de la galerie supérieure	—	10,0	17°0	$6,33 \times 10^{-3}$	1,5	
297	Galerie supérieure, à droite	—	4,2	16°0	$6,52 \times 10^{-3}$	0,5	
298	Romaine	27 décembre 1927	Non mesuré	36°5	$4,80 \times 10^{-3}$	0,7	Diaclases granitiques.
299	Graudon	—	26,0	—	$4,92 \times 10^{-3}$	0,8	
300	Antonia	—	40,0	27°0	$4,80 \times 10^{-3}$	0,7	
301	Des Sais	—	5,0	29°0	$5,15 \times 10^{-3}$	1,8	
302	Saint-Luc	—	1,7	14°0	$3,53 \times 10^{-3}$	0,9	
303	Pradina	—	—	—	—	1,5	

No d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Emanation du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
304	<i>Verrières</i>								
305	De la Commune.....	0°41'8"	45°34'3"	27 juin 1926	2,6	10°7	$1,71 \times 10^{-3}$	0,5	Sortent par les fissures de la lave du Tartaret sur le trajet de trois failles intéressant le granite et convergent vers le sud.
306	— 2	0°42'1"	45°34'3"	—	2,0	9°9	$1,70 \times 10^{-3}$	1,8	
					3,1	10°0	$1,30 \times 10^{-3}$	1,5	
307	<i>Grandeprol</i>								
	De Rognon	0°43'5"	45°35'0"	1 ^{er} juin 1926	16,0	10°7	$3,02 \times 10^{-3}$	0,8	Naît dans un ravin granitique sur une diaclase d'une faille NE-SW.
308	<i>Saurier</i>								
	Rochette	0°42'4"	45°32'3"	27 juin 1926	4,5	15°0	$5,55 \times 10^{-3}$	2,1	Au point de croisement de 2 failles séparant le gneiss des marnes saumâssiennes (à la faveur d'un filon de granulite).
309	Maisie	0°42'7"	45°32'3"	—	3,2	10°0	$5,84 \times 10^{-3}$	0,8	
310	Des Rochers du Caire	0°44'0"	45°32'7"	—	1,1	14°3	$5,00 \times 10^{-3}$	2,1	
311	De Montel	0°44'2"	45°32'6"	—	2,6	14°5	$4,20 \times 10^{-3}$	1,6	
312	Du Russeau	0°41'5"	45°32'6"	—	2,3	14°8	$4,63 \times 10^{-3}$	5,0	Sur une faille NS, dans le granite.
313	De la Tour Rambaud	0°44'7"	45°32'6"	—	2,5	14°0	$4,34 \times 10^{-3}$	1,2	
314	<i>Courgoul</i>								
	De Courgoul	0°42'5"	45°31'3"	—	2,8	13°6	$1,37 \times 10^{-3}$	4,6	Gneiss granitique très altéré avec veinules de leptynite.
315	<i>Ternant</i>								
	De Ternant n° 1	0°47'7"	45°28'5"	8 août 1926	0,8	12°0	$4,58 \times 10^{-3}$	2,0	Sortent du gneiss, filons de granulite aplitique.
316	— 2	0°47'6"	45°28'5"	—	3,0	12°6	$4,70 \times 10^{-3}$	3,6	
317	— 3	0°47'6"	45°28'5"	—	1,6	13°0	$4,85 \times 10^{-3}$	8,3	Sortent du gneiss, filons de granulite.
318	<i>Saint-Hérent</i>								
	De Saint-Hérent	0°49'5"	45°27'8"	—	1,3	10°0	$4,48 \times 10^{-3}$	2,0	Sort des argiles sableuses entre 2 dykes basaltiques sur la direction d'un filon de granite NNE-SSW.

No d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 19°	Élimination du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
319	<i>Madriat</i> De la Boulangère.....	0°50'3	45°26'0	8 août 1926	Non mesuré (moyen)	14°2	$4,02 \times 10^{-3}$	1,9	Au voisinage d'un filon de granulite kaolinisé dans les argiles latéritiques samosiennes.
320	<i>Avignat</i> De Barèges n° 1	0°50'0	45°24'9	5 août 1927	1,0	15°2	$3,47 \times 10^{-3}$	0,6	
321	— 2	0°50'0	45°25'2	—	1,6	14°7	$3,53 \times 10^{-3}$	1,0	
322	— 3	0°50'5	45°25'4	—	8,0	13°4	$3,36 \times 10^{-3}$	1,2	
323	— 4	0°50'7	45°25'5	—	7,5	16°1	$3,63 \times 10^{-3}$	1,1	Gneiss micaschistique.
324	<i>Ardes</i> Ardes	0°49'3	45°24'8	4 avril 1927	11,0	14°8	$3,12 \times 10^{-3}$	traces	
325	Saint-Germain.....	0°49'5	45°24'9	—	6,0	14°4	$3,07 \times 10^{-3}$	traces	
326	Du Grand-Prat n° 1	0°44'2	45°24'5	—	2,0	12°2	$2,07 \times 10^{-3}$	0,1	
327	— 2	0°44'2	45°24'6	—	3,2	12°0	$2,27 \times 10^{-3}$	0,1	Basalte et gneiss granulitique.
328	— 3	0°44'2	45°24'7	—	2,7	12°2	$1,85 \times 10^{-3}$	0,1	
329	Des Granges	0°43'8	45°24'4	—	3,0	12°5	$2,10 \times 10^{-3}$	0,1	
330	De Badendaud	0°41'3	45°24'5	—	2,8	12°0	$1,79 \times 10^{-3}$	0,2	
331	De Chassoles	0°44'4	45°22'4	14 avril 1927	2,0	12°5	$4,13 \times 10^{-3}$	2,0	Sort du gneiss au contact d'un filon NS. de pegmatite à grands éléments et paquets de muscovite par place. (Gneiss riche en biotite traversé par un stockwerk de filonnets à pegmatites.)
332	De la Chapelle de la Volette..	0°45'6	45°21'8	—	3,0	12°0	$3,53 \times 10^{-3}$	18,7	
333	<i>Boudes</i> Impératrices romaines	0°50'0	45°26'9	5 août 1927	1,0	14°1	$5,16 \times 10^{-3}$	0,2	Gneiss pénétré par réseau serré de filons de granulite.
334	De la Commune.....	0°50'0	45°26'9	—	2,1	14°3	$5,16 \times 10^{-3}$	0,1	

La Limagne et le massif éruptif de la Comté. —

La dernière région à parcourir est celle de la Limagne. Ce massif, effondré au point qu'il faut un sondage de 1.200 mètres près de Riom et au pied de la falaise granitique pour retrouver le granite de cette falaise sous les marnes tertiaires (stampien), est peu riche en eaux minérales en son centre, tandis que, sur son pourtour, nous avons trouvé des groupements intéressants.

Au nord-ouest, nous avons les groupes de Saint-Priest-Bramefand et de Saint-Sylvestre. Les sources sont légions, la plupart résultant de sondages très voisins les uns des autres, et leur nombre s'explique par le parrainage de Vichy. Elles sortent des marnes stampiennes à la faveur de failles dépendant de la faille du Forez.

Nous portant à l'axe de la Limagne, nous trouvons au nord les sources de Montpensier et Chaptuzat. La première a été captée par un puits de 30 mètres, prolongé de 7 mètres pour arriver au griffon de la source qui ne jaillit plus au dehors et doit être pompée. Il est probable qu'elle a dû, en profondeur, vers 40 mètres, trouver dans les strates tertiaires une couche perméable qui lui permet de s'écouler ailleurs. C'est une eau chaude (43°) analogue à celles de Vichy.

La même Société exploite le gaz carbonique d'un geyser artificiel aux Martres-de-Veyre, poussé à 140 mètres de profondeur, qu'un sondage fait dans le but de trouver du pétrole fit jaillir, il y a quelques années, des terrains stampiens (marnes et bancs calcaires).

Non loin de ce geyser, se trouvent, sur la rive droite de l'Allier, un petit groupe d'eaux minérales très salines et très calcaires, dont une, « Daguillon »,

donne une radioactivité assez élevée (19,2 millimicrocuries). Dans cette région, il existe une fracture presque invisible, par suite des éboulements, glissements et alluvions qui encombrant le sol au pied du plateau de Beauregard-l'Evêque. Elle traverse, par les eaux de l'Ours, un point éruptif (pépérites de La Grôle) au bord de l'Allier, sous Beauregard, un autre au coin du pont, à Pont-du-Château et, ensuite, par la faille reconnue depuis Cournon, sur la rive gauche de l'Allier, la faille doit mettre la source Daguillon en rapport direct avec les roches granitiques (et leurs filons que recouvre le manteau de marnes stampiennes.

Clermont-Ferrand est le lieu d'émergence d'un certain nombre de sources. A l'ouest, la bordure oligocène jusqu'à environ trois kilomètres de pénétration dans la cœur de la Limagne, en allant de l'ouest à l'est, est divisée par une série de failles parallèles (NS.) qui segmentent le terrain en une grande quantité de tranches, et il n'est pas possible de désigner une fracture plutôt qu'une autre comme lieu de naissance d'une source minérale. Ces failles se retrouvent à Clermont-Ferrand et favorisent la sortie des eaux minérales.

A l'ouest du Livradois, les mêmes efforts dynamiques qui édifièrent le Livradois, firent apparaître le massif volcanique téphritique et phonolitique de La Comté, en même temps que se soulevait, entre Issoire et Corent, le Horst granitique de Four-la-Brouque.

L'exhaussement de Four-la-Brouque fut accompagné d'un mouvement de bascule faisant plonger le granite vers les Martres-de-Veyre, à une pente assez faible pour que la roche granitique reste encore visible vers les bains de Sainte-Marguerite, près de la gare

de Vic-le-Comte, et qu'il soit assez peu recouvert d'oligocène et d'alluvions pour qu'au delà même des Martres, on le retrouve en exploitation rurale. Le granite est sillonné de filons de granulites, d'aprites, de pegmatites à tourmaline et beryl et de roches porphyriques. Ce granite a été brisé sur plusieurs points. Ceci paraît d'autant plus vrai que beaucoup de sources minérales de Sainte-Marguerite sortent d'un filon de microgranulite dans le granite, visible seulement dans le lit de l'Allier, aux basses eaux. Il y a donc une ligne de rupture transversale jalonnée par les eaux minérales du pont de Longue et de Sainte-Marguerite. Une autre rupture semblable, mais invisible, s'est produite et est indiquée par la source très radioactive des Loches, près du pont de Mirefleurs.

N° d'ordre	Désignation des sources	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Emanation du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
	<i>Groupe de Saint-Priest-Brametant et Saint-Sylvestre</i>						
335	Planche	12 mai 1926	3,5	13°0			Les eaux minérales sortent des marnes stampiennes à la faveur de failles dépendant de la faille du Forez. Les sources très rapprochées les unes des autres, sont captées par forage dans une succession de bandes de sables, d'argile et de marne. Nous avons étudié vingt d'entre elles qui correspondent à tous les niveaux aquifères observés jusqu'à 80 mètres.
336	Vereingétorix	—	5,6	12°0			
337	La Perle	—	2,4	12°5			
338	Tabarin	—	4,5	12°0			
339	La Reconstituante	—	6,0	13°0			
340	Victorieuse	—	3,0	12°0			
341	Saint-Hubert	—	2,7	13°0			
342	Alphonse	—	3,1	13°3			
343	La Jade	—	6,3	12°0			
344	Andréa	—	1,5	12°0			
345	Henri IV	—	3,6	13°0			
346	Bosmet	—	3,5	13°0			
347	Gilbert	—	5,5	13°0			
348	La Czarine	—	5,0	12°0			
349	Adam n° 2	—	5,0	13°0			
350	Agréable	—	5,0	12°0			
351	Camille	—	5,0	13°5			
352	Sans rivale	—	6,0	14°0			
353	Radium	—	4,0	12°5			
354	Colbert ou Mazarin	—	5,0	15°0			
355	La Gauloise	—	6,0	12°5			
356	Glorieuse	—	4,0	12°0			
357	Populaire	—	6,0	12°5	5,84 × 10 ⁻³	4,8	
358	Préférable	—	4,0	13°0	5,67 × 10 ⁻³	0,4	
359	Barthomier-Larbaud	—	3,0	13°0	5,67 × 10 ⁻³	0,6	
360	Michel-Hospital	—	5,5	13°0	5,67 × 10 ⁻³	0,4	
361	Alexandra	18 mai 1926	5,0	13°0	5,60 × 10 ⁻³	0,3	
362	Selecta	—	4,5	13°5	5,60 × 10 ⁻³	0,5	
363	Pascal	—	5,5	12°5	5,40 × 10 ⁻³	traces	
364	Chevreuil	—					Marnes stampiennes à la faveur de failles dépendant de la faille du Forez.

N° d'ordre	Désignation des sources	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Émission du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
	<i>Groupe de Saint-Priest-Branceland et Saint-Sylvestre (suite)</i>						
365	Parfaite	18 mai 1926	4,5	13°0	$5,84 \times 10^{-3}$	0,2	
366	Clément-François	—	5,0	13°2	$5,71 \times 10^{-3}$	0,4	
367	Sully	—	6,0	13°0	$5,71 \times 10^{-3}$	0,3	
368	Préventive	—	6,0	14°0	$5,60 \times 10^{-3}$	2,3	
369	Le Sénat	—	6,0	14°0	$5,71 \times 10^{-3}$	0,3	
370	Valda ou Molha	22 mai 1926	6,0	13°0	$5,71 \times 10^{-3}$	0,1	
371	Suprême-Mercédès	—	4,0	13°0	$5,71 \times 10^{-3}$	1,0	
372	Mazarin n° 2	—	5,0	13°0	$5,78 \times 10^{-3}$	0,1	
373	Fénelique	—	5,0	13°0	$5,60 \times 10^{-3}$	0,9	
374	Barré	—	5,0	13°0	traces	traces	
375	Electra	—	3,0	12°5	$5,60 \times 10^{-3}$	0,3	
376	La Joconde	—	8,0	13°2	$5,48 \times 10^{-3}$	traces	
377	Réputée	12 mai 1926	4,5	13°0	$5,71 \times 10^{-3}$	0,4	
							Marnes stampiennes à la faveur de failles dépendant de la faille du Forez.

N° d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Emanation du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
378	<i>Montpensier</i> La Grande Demoiselle	0°52'6"	46°2'5"	17 avril 1927	420	45°0	$4,71 \times 10^{-3}$	1,1	Emerge des marnes stampiennes au voisinage d'un accident accusé par les variations de pendage des marnes au voisinage de la source.
379	<i>Chaptuzat</i> Saint-Mayard	0°50'8"	46°1'4"	—	1,6	12°0	$4,33 \times 10^{-3}$	1,5	
380	<i>Puy-Guillaume</i> Du Ruisseau de Credogne n° 1.	1°8'2"	45°58'2"	7 mai 1926	Non mesuré	11°5	$1,85 \times 10^{-3}$	3,8	Stampien inférieur.
381	— 2.	1°8'1"	45°58'2"	—	—	11°6	$1,76 \times 10^{-3}$	3,2	
382	Puits Robin	1°8'1"	45°58'0"	—	Non mesuré	11°2	$0,17 \times 10^{-3}$	3,8	
383	<i>Martres d'Artières</i> Geyser	0°55'9"	45°50'1"	17 avril 1927	80,0	31°2	$9,60 \times 10^{-3}$	0,8	Faille du stampien.
384	<i>Jose</i> De l'Ours	0°58'9"	45°51'1"	—	90,0	13°3	$3,36 \times 10^{-3}$	0,4	
385	Dagillon	0°58'8"	45°50'8"	—	Non mesuré	14°0	$3,68 \times 10^{-3}$	19,2	
386	Des Graviers	0°58'8"	45°51'0"	—	80,0	13°5	$3,85 \times 10^{-3}$	0,6	
387	Du Petit-Bouillon	0°58'6"	45°50'9"	—	30,0	14°0	$2,50 \times 10^{-3}$	4,1	
388	<i>Clermont-Ferrand</i> Blaise Pascal	0°44'5"	45°47'0"	15 mars 1927	30,0	14°0	$4,20 \times 10^{-3}$	1,1	Emergent dans les alluvions sur le trajet d'un réseau de failles en relation avec le point éruptif du calvaire et la faille du puy de Var.
389	Saint-Alyre	0°44'5"	45°47'0"	—	60,0	22°0	$4,55 \times 10^{-3}$	traces	
390	Endos Sainte-Claire	0°44'5"	45°46'9"	—	Non mesuré	12°0	$4,20 \times 10^{-3}$	0,7	
391	Saint-Pierre	0°44'8"	45°47'2"	—	10,0	15°5	$4,13 \times 10^{-3}$	traces	
392	Sainte-Ursule	0°44'7"	45°47'1"	—	3,3	12°5	$3,73 \times 10^{-3}$	2,1	
393	De la rue Sainte-Claire	0°44'5"	45°47'0"	18 mars 1927	0,4	9°0	$3,68 \times 10^{-3}$	1,7	
394	Refuge Saint-Joseph	0°44'5"	45°46'9"	—	3,6	14°4	$4,20 \times 10^{-3}$	0,5	
395	Puits artésien	0°44'7"	45°46'4"	21 mars 1927	60,0	22°0	$4,88 \times 10^{-3}$	traces	
396	Des Salins	0°44'7"	45°46'2"	—	5,0	18°0	$4,55 \times 10^{-3}$	0,6	
397	Loselot	0°44'9"	45°46'1"	—	3,3	11°0	$3,70 \times 10^{-3}$	1,0	

N° d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Émission du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
398	<i>Clermond-Ferrand</i> Grassion	0°45'5	45°46'4	21 mars 1927	1,4	9°0	$2,04 \times 10^{-3}$	0,1	Sondage dans les arkoses imprégnés de bitume.
399	<i>Marthes-de-Veyre</i> Des Roches	0°51'9	45°41'3	16 mai 1925 6 juillet 1925	17,0	17°0	$1,11 \times 10^{-3}$	8,0	Sort du granite couvert par les alluvions à la faveur probable d'un filon de granulate ou de pegmatite du compartiment granitique de Four-la-Brouque.
400	Du Saut	0°52'0	45°40'8	16 mai 1925	1,9	14°1	$1,11 \times 10^{-3}$	1,2	Granite.
401	De la Cabane	0°52'9	45°40'6	—	3,8	14°8	$3,33 \times 10^{-3}$	0,8	
402	Du Saladi n° 1	0°52'8	45°40'3	—	Non mesuré	21°0	$6,66 \times 10^{-3}$	0,5	Sortent de la base des arkoses au contact du granite.
403	— 2	0°52'8	45°40'3	—	—	24°3	$6,66 \times 10^{-3}$	0,5	
404	Sous le pont de Longue	0°52'3	45°40'1	—	Non mesuré	22°5	$6,66 \times 10^{-3}$	3,4	
405	Petitjean	0°52'2	45°40'1	19 mai 1925	6,5	22°7	$6,66 \times 10^{-3}$	2,2	
406	Nouvelle	0°52'0	45°40'2	—	Non mesuré	22°7	$6,66 \times 10^{-3}$	4,6	Au voisinage de necks de pépérites.
407	Blary	0°52'1	45°40'2	—	—	23°3	$6,66 \times 10^{-3}$	1,5	
408	Du Tambour	0°52'1	45°40'2	—	2,2	23°3	$6,66 \times 10^{-3}$	2,0	
409	<i>Saint-Georges-es-Allier</i> Du Gourgoutlet	0°55'5	45°42'8	13 juillet 1926	Non mesuré	13°3	$1,12 \times 10^{-3}$	0,9	
410	<i>Mirefleurs</i> Puits	0°52'2	45°41'4	16 mai 1925	—	8°6	$2,68 \times 10^{-3}$	3,2	Alluvions.
411	Des Loches	0°52'4	45°41'3	16 et 21 mai 1925 6 et 13 juillet 1926	2,0	21°3	$6,80 \times 10^{-3}$	85,4	Sort du granite couvert par les alluvions à la faveur probable d'un filon de granulate ou de pegmatite du compartiment granitique de Four-la-Brouque.

N° d'ordre	Désignation des sources	Longitude	Latitude	Date du prélèvement	Débit (en litres par minute)	Température	Conductivité électrique à 18°	Emanation du radium en millimicrocuries par litre d'eau	Nature des terrains et filons d'émergence
Saint-Maurice									
412	La Boudeuse	0°53'2	45°40'1	21 mai 1925	Non mesuré	24°0	$7,52 \times 10^{-3}$	0,2	Les sources de l'établissement Sainte-Marguerite, à Saint-Maurice, émergent dans le granite à la faveur d'un filon de microgranulite qui sert de lit à l'Allier.
413	Le Valois	—	—	—	6,7	25°3	$6,66 \times 10^{-3}$	0,5	
414	Du Héron	—	—	—	5,0	16°9	$6,66 \times 10^{-3}$	1,4	
415	Nouvelle	—	—	—	4,0	20°8	$6,99 \times 10^{-3}$	0,6	
416	Des Bains	—	—	—	0,3	13°1	$6,66 \times 10^{-3}$	1,1	
417	De la Chapelle	—	—	—	2,7	14°8	$2,77 \times 10^{-3}$	1,3	
418	De l'Isle	—	—	6 juillet 1926	8,6	23°2	$6,66 \times 10^{-3}$	0,8	
Coudes									
419	Du Pont	0°52'5	45°36'8	15 octobre 1926	2,0	12°9	$5,16 \times 10^{-3}$	0,8	Faille dans le granite.
420	De la Sauloée	0°52'6	45°36'7	—	12,0	12°1	$3,87 \times 10^{-3}$	0,6	
Le Broc									
421	Ludovic	0°55'8	45°30'2	5 août 1927	3,0	13°9	$6,10 \times 10^{-3}$	0,2	Forage exécuté pour la recherche du terrain houiller et poussé à 221 m., a rencontré l'eau minérale à 193 m.
422	Marie-Christine	0°55'5	45°27'9	—	3,0	14°0	$5,07 \times 10^{-3}$	0,1	
423	Du hameau d'Entraignes	0°56'7	45°28'5	—	6,1	10°0	$0,48 \times 10^{-3}$	traces	
Beaulieu									
424	Du château de la Roche	0°57'4	45°28'5	—	4,0	12°0	$3,49 \times 10^{-3}$	4,0	Arkose très argileuse. Gneiss granulitique (région très minéralisée, série de filons de quartz anethyste et plombo-argentifère à gangue barytique.

L'analyse du travail de M. Urbain suggère les réflexions suivantes :

Kaolinisation des feldspaths. — Seul le radon produit par les minéraux constituant la surface des parois des diaclases des roches, lesquelles permettent la circulation des eaux des sources, semble entrer en dissolution et donner aux eaux leur radioactivité ; le surplus de ce corps restant enfermé dans les minéraux constitutifs ou additionnels de la roche. Mais il est possible aussi, ajoute M. Urbain, que la dissociation des éléments de la roche par la kaolinisation des feldspaths et des muscovites, permette la dissolution plus facile du radon occlus, les eaux se chargeant en outre des carbonates de potassium et de sodium libérés.

Que le dégagement du radon occlus soit facilité par la kaolinisation des minéraux des roches, c'est certain quand cette kaolinisation porte surtout sur le mica muscovite, lequel est bien plus résistant que le feldspath à cette influence destructive. Mais il peut aussi y avoir une action mécanique résidant dans la séparation des plans d'accrolement des éléments de la roche au début de la kaolinisation, ce qui rend la roche plus poreuse et facilite la circulation des eaux de pénétration qui ne se fait habituellement que par les diaclases. La lixiviation des éléments radioactifs se trouve ainsi de plus en plus complète à mesure qu'avance la transformation de la roche en arènes. Tous les granites présentent de la kaolinisation plus ou moins avancée depuis la matité et les taches punctiformes jusqu'à la chute en arènes où les biotites et les muscovites se retrouvent à peine en écailles verdâtres de chlorite. La kaolinisation débute par la perte de l'aspect vitreux des feldspaths qui deviennent opaques et c'est ainsi qu'ils se présentent

tous dans le Puy-de-Dôme et ailleurs en général ; puis cette opacité augmente jusqu'à ce que le minéral devienne délité en fragments de plus en plus petits et forme une sorte de sable avant de se transformer en une poudre formant pâte avec l'eau (kaolin). Mais dès les premiers symptômes de cette sorte de maladie des roches feldspathiques, anciennes ou récentes, la roche devient plus poreuse, plus fragile et, sous le choc du marteau, elle tend à se briser en petits morceaux par décollement et clivage de ses éléments, surtout du feldspath. Les roches en grandes masses comme les granites présentent des centres de résistance à cette action kaolinique qui, se trouvant isolés par la désagrégation des autres parties moins résistantes de la masse, forment des accumulations de grosses masses de granite comme on en trouve à Fontanas, près Royat, car dans cette vallée tout le granite a tendance à tomber en arènes.

A Châteldon-Montagne, la source non captée présente, comme roche d'émergence des sables provenant d'arènes granitiques, le granite possède des orthoses et des *micas kaolinisés totalement*.

Fréquence des zircons dans le Puy-de-Dôme. — Les zircons sont communs non seulement dans les muscovites, mais aussi dans les roches trachytiques du Puy-de-Dôme. Beaucoup d'enclaves, arrachées aux profondeurs par les éruptions volcaniques (trachytes et basaltes) sont zirconiennes ; ces enclaves sont constituées par des granulites très fluorées à forme de profondeur.

Appareils volcaniques récemment éteints. — Pour M. Urbain, les sources radioactives doivent se rencontrer de préférence dans les régions à sous-sol cristallin ou

au pourtour des appareils volcaniques en activité ou récemment éteints. Or, dans le Puy-de-Dôme, ce ne sont pas les sources les plus radioactives qui sont les plus voisines des appareils volcaniques ; celles qui sont situées au centre même du vulcanisme ne donnent que peu de radioactivité. La plus forte, en ce sens, serait celle de La Bourboule ; elle sort d'une faille granitique qui a dû rejouer à diverses périodes, mais encore n'est-elle en rien comparable à celle de Châteldon qui est à plus de 60 kilomètres de La Bourboule, et à plus de 40 kilomètres de tout volcan et séparée par une puissante faille-limite.

Parallèle entre Châteldon, Sail-les-Bains et Luchon. — A propos des études faites sur certaines sources très radioactives du sol français, M. Urbain cite les trois sources de Châteldon, Sail-les-Bains et Bagnères-de-Luchon, et dit que chacune d'elles pouvait être considérée comme le type d'une catégorie distincte de sources radioactives.

« Ces trois sources, dit-il, sont placées sur des surfaces de contact entre des terrains cristallins très acides et des terrains sédimentaires, situation qui favorise la production de sources minérales très chaudes. »

La roche cristalline est pour les trois sources le granite. Les sédiments de la surface d'alimentation de Châteldon et de Sail sont de l'époque tertiaire, tandis que les terrains stratifiés de la zone d'où sortent les sources de Bagnères-de-Luchon, sont primaires.

Les sources de Sail et de Châteldon sont situées de part et d'autre d'un massif granitique dont le contact avec les marnes stampiennes est tectonique, et les cheminées d'ascension de ces sources sont constituées par les failles-limites des bassins sédimentaires de la

Loire et de l'Allier, tandis qu'à Bagnères-de-Luchon le contact entre les éléments cristallins et stratifiés, est pétrographique et les eaux sortent par les diaclases du granite et non par une faille.

D'ailleurs, les roches granitiques du Forez et de Bagnères-de-Luchon ne sont pas du tout identiques.

Les sources de Châteldon et de Sail ont même composition que les sources du voisinage qui forment un encadrement du massif du Forez : Vichy, Cusset, Arbrest, Saint-Yorre, Courpière, Sail-sous-Eryat, Saint-Biest-d'Alban, Renaison, etc.

Le parallèle établi entre Sail-les-Bains, Châteldon et Vichy est inexact. Ni Châteldon, ni Sail ne sont sur la faille-limite ; ces deux sources sont en plein granite. Châteldon est dans le granite en arrière de la faille d'effondrement de la Limagne d'environ 1 kilomètre, Sail est dans la même position à 300 mètres de la faille, tandis que Vichy se trouve en pleine Limagne comme Saint-Yorre, puisque tous les sondages ont dû traverser les sédiments tertiaires avant d'arriver au griffon ou à la nappe formée par imbibition d'une zone plus poreuse des arkoses tertiaires.

Rien ne peut faire supposer, quand on l'a étudiée sur le terrain même, que la source de Châteldon-Montagne ait quelque rapport avec les strates marneuses tertiaires de la Limagne.

Plus loin, M. Urbain répète encore que l'aire d'émergence de la source de Châteldon comprend des sédiments tertiaires. Ils sont en contre-bas des points d'émergence d'environ une centaine de mètres. Quelle est donc leur influence ?

Granite des galeries de captage de Bagnères-de-Luchon. — Tout ce qui est voûte de granite (microgra-

nite, granulite ou pegmatite, est certainement plus riche en éléments fluorés par suite de cristallisations pneumatolytiques résultant de l'abondance des éléments de fumerolles du magma granitique.

Ces particularités s'observent aux galeries de captage de Bagnères-de-Luchon.

Filons de Châteldon. — Revenant ensuite sur la source de Châteldon-Montagne, M. Urbain reparle de la position de cette source et insiste sur ses rapports de contact entre le granite et les terrains sédimentaires tertiaires (Stampien). Puis il fait un résumé de l'histoire orogénique du Plateau Central et plus particulièrement du Forez et de ses filons de granulite, microgranulite et quartz.

Il indique notamment que ces filons de quartz sont formés de filonnets nombreux se réunissant en nœuds sur certains points, et dans les interstices de leurs cristaux se loge la chalcolite, mais que, dans certains cas, ces cristaux ne sont pas visibles et sont mélangés à un sable kaolinique très fin logé dans les interstices des cristaux de quartz.

Ce sel d'urane se rencontre en quantité suffisante pour indiquer une exploitation et serait de 5 à 10 milligrammes par tonne de quartz, ce qui explique la teneur en radon de la source observée et analysée par M. Jacquet, qui est de 105,0 à 106,3 millimicrocuries par litre.

« Le filon (de quartz) dont parle M. Jacquet, dit-il, n'est pas en réalité unique ; c'est un faisceau de filonnets en général très minces (1) mais renfermant des renfle-

(1) Les filons de quartz aussi bien du Forez que du Livradois ou d'autres parties du territoire cristallin, présentent tous cette particularité qu'explique le mode de rupture des roches de se présenter sous forme de filonnets s'agglutinant par place en

ments en forme de nœuds dans lesquels sont concentrés la majeure partie des phosphates d'uranyle, etc. »

Il y a lieu de faire une distinction entre les filons des travaux de recherche du radium, à Lachaux, à 8 kilomètres au NE. de Châteldon et tout récemment à Saint-Rémy-sur-Durolle, et les filons intéressant plus spécialement Châteldon.

Nous avons vu (près de chez Roffin), au-dessus de la route de Ris, trois filons dont l'un coupé de tranchées successives sur près de 250 mètres de longueur, avait un peu plus de 3 mètres de puissance et les autres 1 mètre et 0 m. 50, et partant les cristaux ou enduits de chalcopite étaient placés dans les vides laissés entre les cristaux de quartz ou dans les craquelures du filon. La même chose se reproduit dans les fluorines, démontrant enfin que l'urane est arrivée après la formation des filons de quartz rubanés, colorés, enfumés, améthysés, souvent rubéfiés.

Quant à Châteldon proprement dit, il y a lieu de faire une distinction entre les sources de la Montagne, situées sur la rive gauche du Vauziron, et celles des Vignes, sur la rive droite. Les teneurs en radon de ces deux groupes ne sont pas du même ordre de grandeur ; seules les sources de la Montagne possèdent une radioactivité très élevée.

Au-dessus de la source captée, sur la pente rapide

renflements atteignant plusieurs mètres de puissance. C'est ce que l'on remarque dans les exploitations de quartz améthyste. La position des sels d'urane dans les filons de quartz, c'est-à-dire leur intercalation soit à l'état de lamelles cristallines situées dans les fines cassures et intertices du quartz ou mêlées en des grandeurs variables aux argites collyritiques du filon, témoignent de la venue uranique bien postérieurement à la formation du filon qui les contient.

de la montagne, un affleurement de quartz enfumé se trouve sur le trajet d'un gros filon de quartz (sans particularités spéciales aux points d'affleurements observés), qui termine la crête et se prolonge sur 4 kilomètres.

La source non captée à 490 mètres W. présente comme roche d'émergence des sables provenant d'arènes granitiques hématisés ; le granite possède des orthoses et des micas kaolinisés totalement.

En résumé, à notre avis, la majeure partie de la radioactivité des eaux est acquise dans leur trajet ascensionnel. Dans la phase de descente, les eaux superficielles se chargent de l'émanation du radium des roches rencontrées (1). Vu la durée souvent très grande de cette période de pénétration, la radioactivité acquise par les eaux non chargées ou peu chargées encore de gaz carbonique se perd en partie ; par contre, le trajet ascensionnel est beaucoup plus court, le gaz dissous dans les eaux facilite les dissolutions.

Si nous appliquons cette manière de voir à l'examen des phénomènes qui se passent dans les sources de Bagnères-de-Luchon, on est conduit à faire les remarques suivantes. La partie profonde du trajet des eaux se passe dans le granite et la radioactivité conservée à la fin de cette période est une fraction assez faible de celle trouvée à l'émergence. La plus grande partie de celle-ci, au contraire, sera acquise pendant la traversée d'une zone parsemée de pegmatites et granulites dans la région où les eaux sont captées et tout se passe-

(1) Une vingtaine de déterminations du radon dissous dans les eaux superficielles circulant dans les filons riches en chalcolite recherchés par tranchées un peu au SE. du village du hameau de Gagaud, nous ont donné des teneurs par litre oscillant entre 1 et 8 millimicrocuries.

rait comme si les eaux de Bagnères-de-Luchon sortaient de filons de pegmatites et granulites, ce qui explique leur radioactivité élevée. Sans vouloir classer cette source dans le type filonien, nous serions porté à la classer dans le groupe des sources mixtes de M. Urbain, donc dans une catégorie qui doit être assez répandue.

Nous avons observé, au voisinage des filons de Châteldon-Montagne, renfermant de la chalcolite et ceux du Bouchet (où nous n'en avons pas observé) — filons de pegmatite et quartz à béryl — dans les roches encaissantes des teneurs en radium bien supérieures aux 0,002 de milligrammes par tonne que Strutt et d'autres auteurs ont signalé dans les granites. Au Bouchet, les sources non captées, donc soumises directement aux infiltrations superficielles, naissent au voisinage de filons dans les diaclases d'une roche qui prend la forme pegmatoïde. Nous classons néanmoins cette source dans le type filonien, estimant filonienne une source qui emprunte la majeure partie de sa radioactivité observée à l'émergence au passage soit dans le filon, soit au contact des roches encaissantes.

CONCLUSIONS

1° Nous avons recherché et étudié toutes les sources minérales du département du Puy-de-Dôme (plus de 400) dont un certain nombre ne sont pas indiquées sur les cartes ni mentionnées dans les publications antérieures, voire même sont peu connues des habitants des hameaux au voisinage desquels elles sourdent. Nous avons dressé une carte de ces sources ;

2° Nous avons obtenu dans les diverses variétés de terrains, une gamme très étendue de la teneur en radon dissous des eaux minérales. Nous avons, le premier, signalé les teneurs élevées des sources de Châteldon-Montagne (105,8 millimicrocuries par litre) et des Loches aux Martres-de-Veyre (85,4 millimicrocuries), les deux sources françaises les plus radioactives actuellement connues ;

3° Nous avons considéré l'étude systématique des sources comme une méthode de prospection préliminaire pour apprécier la richesse des gîtes radioactifs. Certains filons de la chaîne du Forez paraissent riches en chalcite et cependant la teneur en radon des sources qui en émergent est parfois assez faible. Nous délimitons au district NE. du département la zone radioactive où les gîtes paraissent exploitables ;

4° Nous avons reconnu filoniennes un grand nombre de sources et caractérisé la nature d'un certain nombre de filons non signalés jusqu'ici ;

5° Les roches encaissantes, au voisinage de filons radioactifs, peuvent présenter des teneurs en radium bien supérieures aux 0,002 de milligramme par tonne de roche trouvés dans les granites par Strutt et d'autres auteurs.

Magnétisme des roches volcaniques

Comme suite à notre travail de prospection des éléments radioactifs inclus dans les roches du département du Puy-de-Dôme, nous avons tenu à apporter une contribution à l'étude du magnétisme des roches volcaniques de ce département.

Un coup d'œil jeté sur les cartes géologiques, montre que les apports volcaniques sont très variés. On observe toute la gamme des roches depuis les roches acides (rhyolites) jusqu'aux basaltes en passant par l'intermédiaire des andésites. De plus, le volcanisme est bien daté. Au cours de fréquents déplacements nécessités par l'étude des eaux minérales, nous avons prélevé environ 300 échantillons de roches volcaniques des principaux puys représentant les différentes variétés ; quelques-uns ont été prélevés en différents joints d'une même coulée.

Historique. — Le premier travail en date sur le magnétisme des roches volcaniques est celui de Pockels, 1897 (1). Pockels étudie les moments magnétiques temporaires et permanents de trois sortes de basaltes suivant la méthode magnétométrique connue. Il trouve que, pour deux espèces de basalte, les fonctions d'aimantation (susceptibilité et perméabilité) se produisent à peu près suivant la teneur en magnétite. Pour séparer la magné-

(1) F. POCKELS, 1897 : *Wied Ann* 63, 195. *Sur les propriétés magnétiques de trois échantillons basaltiques.*

tite, une quantité pesée des débris de roche est réduite en poudre fine, secouée et charriée dans l'eau ; les éléments magnétiques sont séparés à l'aimant. C'est un triage bien imparfait et nous n'avons rien à retenir de cette étude pour notre travail. Toutefois, nous mentionnerons que, dans la deuxième partie de cette étude, il est traité de l'aimantation permanente exceptionnelle de certaines roches, attribuée aux décharges de la foudre.

En 1913, H. Takagi (1) étudie la susceptibilité magnétique d'une soixantaine d'échantillons recueillis par le P^r A. Tanakadate, de Tokio, pendant son service magnétique (1893-1896) au Japon. Il utilise la méthode d'attraction dans un champ non uniforme (2). La substance, suspendue à l'une des extrémités du fléau d'une balance, est placée entre les pôles d'un électro-aimant dans la région du maximum du produit $H \frac{\partial H}{\partial z}$;

le corps étudié peut être porté à différentes températures au moyen d'un four électrique où circule un courant d'azote.

L'action du champ sur la substance est compensée au moyen d'un ressort à axe vertical solidaire du fléau et dont l'extrémité inférieure peut être déplacée au moyen d'une vis micrométrique ; les déplacements sont équivalents (étalonnage préalable) à l'action de masses marquées. On réalise ainsi une méthode de zéro.

L'échantillon est pulvérisé dans un mortier de porcelaine et une quantité variant entre 1 centigramme et 1 décigramme est soumise à l'expérimentation.

(1) H. TAKAGI, 1913 : *Science reports of the Tôhoku Impérial University*, II, 1913, p. 15. *On the susceptibility of soils and sands.*

(2) K. HONDA, H. TAKAGI : *Science report of the Tôhoku Impérial University*, I, 1913, p. 230.

L'auteur s'est aussi préoccupé de conditions analogues aux conditions naturelles. La susceptibilité fut mesurée par une méthode magnétométrique dans des champs faibles sur dix échantillons. Les valeurs furent trouvées sensiblement constantes, de telle façon qu'elles peuvent être considérées comme identiques à leur valeur initiale en considération du champ. Des préparations furent faites par les soins de S. Ebuti, pour déterminer les constituants des échantillons au microscope (plagioclase - hornblende - augite - hypersthène - magnétite). Tous les échantillons observés ont montré des variations semblables de susceptibilité en fonction du champ. La valeur de la susceptibilité va de plusieurs milliers à quelques dizaines de fois 10^{-6} unités CGS. Il s'agit de ferromagnétisme. Les variations de la susceptibilité aux températures élevées furent recherchées sur dix échantillons.

H. Takagi constate que la susceptibilité décroît rapidement quand la température croît ; à une température qui va de 580° à 600° , la valeur des susceptibilités de tous ces échantillons devient très petite. Les courbes sont données ci-après (pages 85 et 86). L'auteur conclut qu'il semble très probable que les constituants magnétiques sont des composés du fer (1). Il admet d'ailleurs implicitement, d'autre part, que le constituant magnétique est la magnétite, celle-ci figurant dans les tableaux des constituants des échantillons avec son pourcentage dans la roche. Les courbes obtenues ne sont pas nettes et on y décèle difficilement des points de Curie. Malgré que le chauffage soit effectué dans un courant d'azote,

(1) La conclusion paraît étrange, il eut été plus naturel de parler de magnétite.

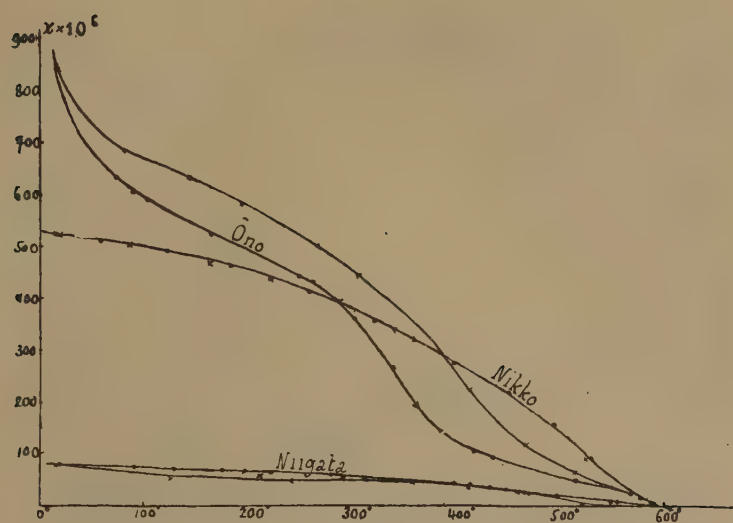


FIG. N° 4

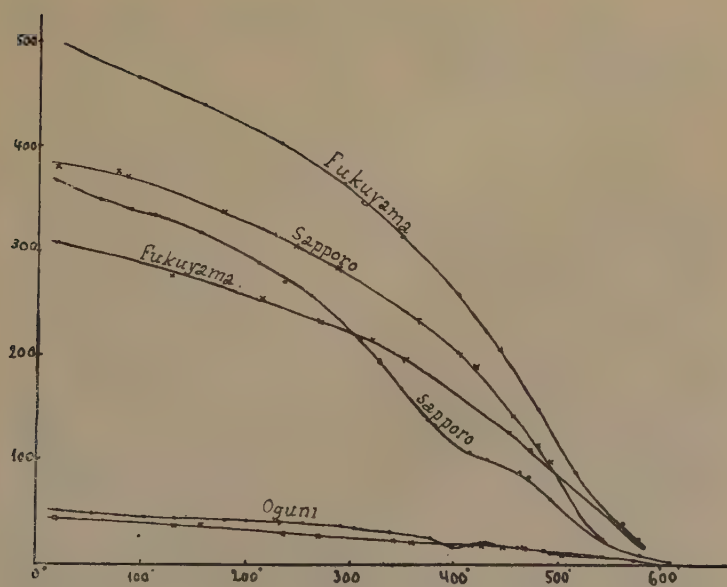


FIG. N° 5

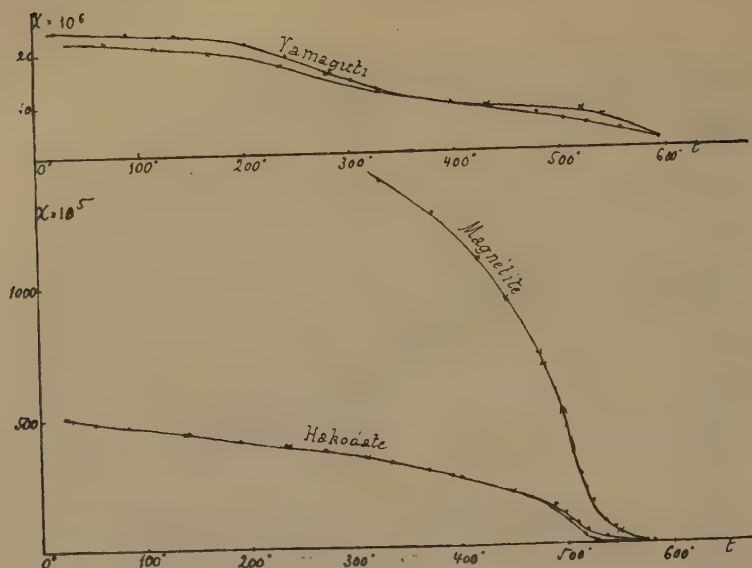


FIG. N° 6

des oxydations partielles se produisent. L'auteur fait d'ailleurs cette remarque.

Analysons maintenant le travail de MM. Lœwinson et A. Turcev.

PREMIÈRE NOTE (1). — L'hypothèse suivante, confirmée par des expériences sur des roches diverses, a été émise dans un ouvrage en collaboration avec le professeur V. Mitkevitch.

« Les roches qui reçoivent leur aimantation permanente du champ magnétique terrestre (exemple, les laves pendant leur refroidissement et leur solidification), ne sont pas aimantées à saturation. Ces roches-là, dans un champ intense, doivent s'aimanter considérablement.

(1) F. LÆWINSON-LESSING et A. TURCEV : C.R. U. R. S. S., 23 mars 1927. *Recherches expérimentales sur l'aimantation permanente de roches soumises au chauffage.*

« Par contre, les roches dont la polarité magnétique intense provient d'une décharge de la foudre, sont si fortement aimantées, que des champs de 1.000-2.000 gauss ne peuvent les aimanter davantage.

« Une telle roche, désaimantée puis soumise au chauffage, acquerra, par un refroidissement pareil à celui des expériences de Melloni et Folgheraiter, une aimantation beaucoup moins intense que la première. Ce même morceau de roche, placé ensuite dans un champ magnétique puissant, acquerra une nouvelle aimantation permanente atteignant ou même dépassant l'aimantation antérieure à la désaimantation. »

Pour justifier ces conclusions, les sept roches suivantes furent étudiées.

- (1) Mélaphyre amygdalaire de Crimée ;
- (2) Diabase de Laponie ;
- (3) Basalte aphanitique du Caucase ;
- (4) Andésite filonienne de Karadagh (Crimée) ;
- (5) Mélaphyre d'Allemagne ;
- (6) Basalte fondu d'Auvergne ;
- (7) Basalte de Mongolie.

Seules, les deux premières roches furent désaimantées d'abord, à grand'peine. Ensuite, le morceau de roche, suspendu par un fil de platine dans un creuset de platine, placé à l'intérieur d'un four d'asbeste cylindrique, était chauffé par un bec de gaz. La température était mesurée par une pince thermo-électrique de Le Châtelier. La roche revenue à la température ordinaire avait son aimantation mesurée par la déviation de l'aiguille d'un magnétomètre sensible. Le champ magnétique artificiel était donné par un aimant d'acier en fer à cheval et s'élevait à 300 gauss.

Les premières expériences, faites sur les sept sortes

de roches énumérées, justifiaient l'hypothèse faite précédemment. Les auteurs n'y ont pas poussé le chauffage au delà de 900° car, la température ayant atteint une fois 1.100°, l'échantillon de roche (basalte) fut en partie fondu.

La question suivante se posa : jusqu'à quelle limite doit-on pousser le chauffage pour obtenir dans le champ magnétique terrestre l'effet maximum ? Pour la résoudre, des essais furent faits avec un morceau d'andésite du Karadagh (Crimée), puis sur du basalte de Mongolie. Ils ont permis de formuler les conclusions suivantes :

1° Les roches qui, après avoir été chauffées, se refroidissent dans le champ magnétique terrestre, y acquièrent la polarité magnétique ; si elles sont douées d'une aimantation permanente naturelle, leur aimantation devient plus intense. La polarité magnétique acquise ainsi est faible et dévie l'aiguille du magnétomètre de quelques millimètres seulement. Pour obtenir des déviations de plusieurs centimètres, il faut disposer d'un champ magnétique puissant, plusieurs centaines de fois supérieur au champ terrestre. Cela s'accorde avec l'hypothèse que les roches douées d'une pareille polarité magnétique n'ont pas dû s'aimanter dans le champ terrestre, mais dans un champ beaucoup plus puissant, tel que celui que produisent les décharges de foudre ;

2° L'aimantation des roches chauffées d'abord et refroidies ensuite ne commence qu'à une température de plusieurs centaines de degrés, et leur aimantation permanente s'accroît avec la température de chauffage ;

3° Pour obtenir sur des morceaux de lave ou de diabase à aimantation permanente intense, la polarité magnétique antérieure à leur désaimantation, un champ

magnétique de 300 et même de 400 gauss est nécessaire. Si on admet que leur polarité a été produite par le champ terrestre pendant leur refroidissement, ce champ terrestre avait 600 à 800 fois son intensité actuelle. Il semble que cette supposition ne soit pas fondée et que l'on ait affaire à l'effet des décharges de la foudre et non à l'action du champ magnétique terrestre.

2^e NOTE (1). — Dans la note précédente, le basalte et l'andésite chauffés à des températures diverses se comportent différemment, le chauffage à 300° ayant un effet faible ou nul, leur polarité s'accroissant après le chauffage à 600° et augmentant encore quand la température est portée à 900°.

Les auteurs étudient le rapport qui existe entre l'aimantation permanente des roches et la température de chauffage. Dans ce but, ils expérimentent d'abord la roche (3), basalte sans olivine, des environs de Borjom (Caucase). Portée à 300° et 400°, l'aimantation diminue. Cette roche ne s'aimante que très faiblement par chauffage ; de plus, dans un champ magnétique de 300 gauss, elle prend une aimantation permanente très inférieure à celle des autres basaltes (en particulier les basaltes de Mongolie et d'Auvergne) ;

2^o Le basalte d'Auvergne a une polarité plus intense que celle du basalte de Borjom, vraisemblablement due à des enclaves considérables d'olivine. On en a fait cinq échantillons A, B, C, D, E.

L'échantillon A, ayant acquis après plusieurs chauff-

(1) F. LÆWINSON-LESSING et A. TURCEV : *C. R., U. R. S. S.*, 4 mai 1927. *Recherches expérimentales sur l'aimantation de roches soumises au chauffage.*

fages une polarité assez intense, fut soumis de nouveau à des chauffages successifs qui, à partir de 200° et par bonds de 100°, le portèrent à 1.000°. L'aimantation, au lieu de croître avec la température de chauffage, passe par un minimum à 700°.

Le même échantillon, ayant acquis à 1.000° une polarité donnant la déviation 18° du magnétomètre, fut chauffé de nouveau par bonds de 100° à partir de 200°. Un minimum relatif correspond au chauffage à 200° et un autre à 400°. A 700°, il y a, cette fois, un maximum, après quoi l'aimantation décroît jusqu'à 900°.

L'échantillon B passe par un maximum à 700° ; après, l'aimantation décroît. A propos de cette divergence des résultats, les auteurs rappellent que Hilpert et Colver Glauert disent, au sujet de l'acier nickeux :

« Il s'est trouvé qu'un même alliage peut posséder une capacité d'aimantation très variable en raison des changements de température qu'il a préalablement subis. »

L'échantillon D chauffé seulement à 500°, 700°, 900° a donné un minimum prononcé à 700°. Pour éviter une influence possible de la forme et des défauts des blocs détachés à coups de marteau, les auteurs répètent les expériences sur deux barreaux quadratiques de basalte d'Auvergne et retrouvent dans ces deux échantillons des minima à 400° et 700°. Que signifient ces points spéciaux ? Les auteurs pensent que vu la complexité de la composition du basalte, on peut croire que l'olivine influe plus que la magnétite sur la capacité de s'aimanter fortement. Car le basalte d'Auvergne, riche en olivine, est susceptible d'une aimantation intense, tandis que le basalte de Borjom,

assez riche en magnétite, mais pauvre en olivine, ne possède qu'une très faible aimantation permanente.

Les recherches d'un grand nombre d'auteurs (Malguti, Abraham, Chevallier...), montrent que la magnétite, chauffée à 350°, se transforme en oxyde ferrique Fe^2O^3 et perd son aimantation permanente entre 600° et 700° et ne la recouvre qu'à haute température (1). Lœwinson et Turcev espèrent que les basaltes chauffés montreront la transformation de Fe^3O^4 en Fe^2O^3 et vice versa (2). Or il n'en est rien, car il n'existe aucun rapport précis entre la teneur de la roche en magnétite et son aimantation permanente, la « capacité d'aimantation » (3) des roches éruptives et métamorphiques n'étant pas due uniquement à la magnétite.

L'olivine n'éprouve aucune modification aux tem-

(1) Nous devons faire une distinction entre la magnétite obtenue à basse température et celle obtenue à haute température.

Magnétite obtenue à basse température par l'un des deux procédés suivants :

1° Précipitation par NaOH, KOH d'un mélange de sels ferreux et ferriques dans des proportions convenables (Fe^2O^3 , FeO). La solution est portée à l'ébullition ;

2° Réduction de Fe^2O^3 par l'hydrogène et H^2O vapeur à basse température (300°-400°).

Cette magnétite chauffée à l'air s'oxyde spontanément quelquefois avec incandescence en donnant un Fe^2O^3 *ferromagnétique*. Cet oxyde se détruit irréversiblement vers 600°. Il ne s'agit pas d'un point de Curie, mais d'une destruction moléculaire.

La magnétite obtenue à haute température, par exemple par oxydation du fer au rouge par la vapeur d'eau, etc., ne s'oxyde pas à l'air et est remarquablement stable.

(2) L'oxydation est d'ailleurs impossible, la magnétite étant protégée contre l'action de l'air par la masse vitreuse qui l'entoure.

(3) Le terme « capacité d'aimantation », peu usuel, semble indiquer l'aptitude à l'aimantation.

pératures de chauffage du basalte, elle demeure inaltérée ; elle ne fond même pas dans le basalte fondu. La fraîcheur de la roche indique que le chauffage n'a dû produire sur le basalte aucune modification appréciable, contrairement à ce qui se serait produit avec une roche décomposée ou riche en eau, telle que la serpentine ;

3° Habituellement, on termine le chauffage par le refroidissement naturel jusqu'à la température ambiante, la roche restant dans le cylindre où on la chauffait.

L'expérience faite sur un morceau d'andésite du mont Lialvar, prouve que le refroidissement, activé avec une trompe, donne des résultats analogues.

Par chauffage à 900°, cette andésite ne faisait dévier l'aiguille du magnétomètre que de 5° ; la déviation était 71° quand on la mettait dans un champ de 300 gauss ; chauffée de nouveau à 900°, la roche perdait sa polarité et, à la température ambiante, redonnait la déviation de 5° au magnétomètre ; le champ de 300 gauss faisait ensuite remonter la déviation de 5° à 71°, etc. Cette roche contient des enclaves à polarité intense. Pour porter l'aimantation de cette andésite au degré de celle des enclaves, il fallut la soumettre à un champ de 1.770 gauss.

Les auteurs pensent que cette expérience appuie l'idée que les crêtes de l'ancien cratère du mont Lialvar et les cîmes isolées à forte aimantation (qui renferment les enclaves de l'andésite expérimentée), se sont aimantées dans un champ égal à plusieurs milliers de fois le champ terrestre et ils concluent de nouveau que l'on se trouve en présence d'un effet de décharge de la foudre ;

4° Le basalte d'Auvergne, presque dépourvu d'aiman-

tation naturelle, chauffé à 900°, dévie de 14° le magnétomètre et acquiert dans le champ de 300 gauss une aimantation qui chasse l'aiguille du magnétomètre hors des limites de son échelle graduée ; un deuxième chauffage à 1.000° redonne la déviation de 14°.

Conclusion : Le chauffage supprime toute aimantation permanente des roches indépendamment de la façon dont elle a été acquise et détermine une polarité nouvelle qui dépend du champ magnétique terrestre au moment du refroidissement, polarité toujours très inférieure à celle que les auteurs attribuent à l'effet d'une décharge de foudre ;

5° Les auteurs attachent une importance extrême aux expériences faites avec l'andésite à fulgurites du sommet du petit Ararat. Ce sommet est le point habituel des décharges de la foudre. L'andésite dont il est formé est strié de fulgurites vitreuses vert-bouteille qui traversent la roche dans les directions les plus variées. Cette roche manifeste une aimantation permanente très intense dont l'origine atmosphérique n'est pas douteuse.

Un chauffage à 950° désaimante cette andésite, lui laissant une aimantation permanente correspondant à 12° au magnétomètre. Le champ de 300 gauss ne détermine qu'une polarité de 26°, plusieurs fois inférieure à sa polarité primitive. Il fallut le champ de 1.770 gauss pour lui redonner une aimantation ayant le caractère de la première. L'andésite à fulgurites a donc été aimantée dans un champ égal à plusieurs milliers de fois le champ terrestre actuel.

Un morceau d'andésite du mont Lialvar (Caucase Mineur) donna lieu à des observations analogues.

Conclusions : 1° Les expériences sur l'andésite du

mont Lialvar et l'andésite à fulgurites du sommet du petit Ararat confirment les conclusions précédentes au sujet de l'origine atmosphérique de l'anomalie magnétique que manifestent les roches de crêtes et de cîmes isolées ; elles témoignent en faveur des vues émises par F. Lœwinson-Lessing et V. Mitkevitch ;

2° L'élévation de la température du chauffage produit sur ces roches un accroissement de l'aimantation permanente que ces roches acquièrent en se refroidissant dans le champ terrestre. Le basalte d'Auvergne présente à 400° et 700° des minima relatifs de l'aimantation permanente.

3^e NOTE (1). — Les courbes donnant l'aimantation permanente du basalte d'Auvergne en fonction de la température de son chauffage ont deux minima à 400° et à 700°. Les auteurs ont voulu étendre leurs expériences à d'autres roches pour répondre à la question : ces minima sont-ils particuliers au basalte ? Sont-ils, au contraire, propres à d'autres roches ? Les expériences ont porté sur le gabbrodiabase (2) du lac Oméga.

Dans une première série d'expériences, l'échantillon de gabbrodiabase a été porté successivement à 500°, 700°, 900° puis chauffé à 1.000°, 1.100°, et 1.200°, après quoi il a commencé à fondre. Les températures de

(1) F. LÆWINSON-LESSING et A. TURCEV. *C. R., U. R. S. S.*, 18 mai 1927. *Recherches expérimentales sur l'aimantation de roches soumises au chauffage.*

(2) Gabbrodiabases (BROGGER 1890) : *Roches de profondeur, intermédiaires entre gabbros et diabases*. Lœwinson-Lessing a donné ce nom à des diabases intrusives à structure granitique ou à des gabbros où l'augite remplace le diallage = Diabases granitoïdes de Michel-Lévy. *Augitdiorit* (partim.), *Augitgabbro* (ZfKr 1890, XVI, p. 22).

chauffage du deuxième échantillon ont été espacées de 100° comme celles du basalte d'Auvergne.

Conclusion : Les laves dont la solidification commence à 1.100-1.200° sont capables de s'aimanter d'une façon plus intense que les échantillons qui ont subi un chauffage à 900° seulement.

La courbe relative au deuxième échantillon ne diffère de la première que par un minimum insignifiant à 400°, sans minimum à 700°. N'ayant pas marqué de minimum, le premier échantillon fut chauffé supplémentairement à 600° (par deux fois), à 400° et à 800°.

A ces deux dernières températures correspondent des intensités d'aimantation démesurées qui communiquent à la courbe une allure anormale. Comparés aux valeurs exceptionnelles et à la courbe anormale résultant du chauffage réitéré du basalte d'Auvergne, on est en droit d'en conclure que ces faits ne sont point accidentels.

On pourrait en conclure que la capacité d'aimantation des roches dépend de leurs traitements thermiques antérieurs et que des chauffages réitérés suivis de refroidissements, augmentent cette capacité d'aimantation. Au cours de ces expériences, se pose la question suivante : quelle est la cause de l'aimantation des roches soumises au chauffage ?

Pour résoudre cette question, les auteurs ont étudié différents minéraux.

D'abord l'olivine. Les agrégats verts, à structure granuleuse, provenant de l'Eiffel, ont servi à préparer un prisme semblable à ceux taillés dans le basalte et le gabbro-diabase. Des chauffages à 300°, 400° ne donnèrent aucune déviation au magnétomètre ; de même pour le champ de 300 gauss.

Au microscope, l'olivine contient du pyroxène et pas de magnétite. Des prismes semblables ont été taillés dans une pyroxénite de l'Oural entièrement formée de diallage et dépourvue de magnétite. Un de ces prismes, dans le champ de 300 gauss, ne prit qu'une faible polarité de 13° . Un autre porté à 300° , 500° , 700° , 900° donna respectivement 0, 0,5, 2° , 2° au magnétomètre.

Des cristaux de glinkite (17% d'oxyde ferrique) d'augite, d'amphibole, de diallage et d'acgirine (contenant de l'oxyde de fer) ne se sont pas laissés aimanter ni par chauffage ni dans le champ de 300 gauss.

Dès lors, pour expliquer la polarité relativement intense du basalte, du gabbro, etc., l'une des deux hypothèses suivantes doit être valable :

Première hypothèse : La capacité d'aimantation des roches dépendrait de la présence de la magnétite parmi leurs composants, cette capacité étant grossièrement proportionnelle à la magnétite ;

2^e hypothèse : « Dans les roches, comme dans les alliages métalliques, des composants dépourvus d'aimantation permanente formeraient une substance douée d'une certaine polarité. » Des expériences ultérieures sont nécessaires pour éclaircir cette question.

Disposant d'un champ magnétique plus puissant et d'un magnétomètre plus sensible, F. Loewinson-Lessing et V. Mitkevitch ont constaté qu'un échantillon d'olivine granulaire de l'Eiffel, pareil à ceux dont il vient d'être question, ainsi qu'un échantillon d'actinolite (1) ont manifesté une polarité naturelle intense et se sont fortement aimantés dans le champ magnétique de 3.500 gauss.

(1) Roche où l'actinote domine.

Les expériences précédentes faites avec des champs trop faibles ne permettent donc pas de conclusion.

L'attention des auteurs s'est portée sur l'augmentation accusée de la polarité des roches due à des chauffages de 1.000°, 1.200°, cas où leur polarité approche de celles des roches à anomalie magnétique. La solidification des laves, commençant précisément à ces températures élevées et l'action de ces températures sur les laves créent des conditions tellement favorables à leur aimantation, que celle-ci peut déterminer la polarité que nous cherchons à attribuer à une décharge de foudre.

Les auteurs pensent que ces conditions sont insuffisantes pour cela. En effet, les points exceptionnellement hauts des courbes résultent des chauffages réitérés précédés de toute une série de chauffages partiels. On pourrait avoir affaire à l'effet de la réitération du chauffage.

Pour résoudre cette question, un nouveau prisme de gabbrodiabase, qui n'avait subi aucun traitement thermique et dont la polarité naturelle était de 4°5, fut chauffé 20 minutes à 900°, d'où une déviation de 21° du magnétomètre. Un deuxième chauffage à 900° pendant une heure et demie, donna 26° ; un troisième chauffage de 2 h. 5 donna 38°. La durée du chauffage influe peu, car deux prismes de gabbrodiabase identiques portés à 900°, l'un pendant une demi-heure, l'autre pendant 2 heures, ont donné respectivement 26° et 27°5.

Les auteurs concluent que la durée du chauffage n'influe pas sur l'intensité de l'aimantation permanente des roches et que les expériences décrites ici ne contredisent pas leur opinion sur l'origine atmosphé-

rique de la polarisation anormale que manifestent certaines crêtes et sommets de montagne ainsi que certaines pierres isolées.

La partie de l'étude où les auteurs vérifient les causes de la polarité exceptionnelle de certaines roches et l'attribuent aux décharges de la foudre est la confirmation de l'opinion généralement admise après les travaux remarquables de plusieurs chercheurs. Personnellement, nous ne nous sommes pas engagés dans cette voie et retenons seulement l'autre partie du travail.

La méthode suivie par les auteurs est tout à fait incertaine, les aimantations rémanentes ne sont comparables que si on part de la saturation, ce qui n'est jamais le cas.

Il n'y a pas lieu de croire, d'autre part, que les roches qui, après avoir été chauffées, se refroidissent dans le champ magnétique terrestre, y acquièrent une polarité magnétique plus intense que celle due à leur aimantation permanente naturelle ; ces deux aimantations sont tout à fait indépendantes l'une de l'autre.

Il n'y a pas lieu d'être surpris alors de l'absence de conclusions malgré le gros travail nécessité par cette étude.

Nous trouvons, dans les *Constantes Physiques*, un certain nombre de déterminations de susceptibilité magnétique de produits naturels faits dans des champs faibles et souvent mal définis.

Un autre travail récent est celui d'un géologue de Genève, M. Albert Brun (1).

Cet auteur rappelle que les pétrographes désignent

(1) A. BRUN : *L'évolution des oxydes du fer*. Arch. de Genève (5)-6, 244.

sous le nom de magnétites ou titanomagnétites, les granules opaques magnétiques ayant la composition d'oxydes de fer. L'analyse des macro-cristaux (1) triés donne à peu près la même formule Fe^3O^4 . Il s'inquiète de savoir si les petits cristaux rendant presque toutes les laves opaques ont même composition. Cette crainte est légitimée par le fait que la quantité de peroxyde dosé ne correspond pas du tout à la quantité de prétendues magnétites observées au microscope.

D'autre part, la puissance et la vitesse d'absorption de l'oxygène par ces roches ne cadrent ni avec les propriétés des silicates ferreux ni avec celles de la magnétite. Il observe des verres naturels basiques, tout d'abord isotropes, parfaitement limpides et transparents en coupe mince. A l'extrême début de la cristallisation, le verre volcanique contient des trichites de feldspaths entourés d'une auréole sombre, opaque, qui s'agrandit par la suite, s'individualise au fur et à mesure que les feldspaths et autres minéraux s'accroissent ; à un certain moment on distingue les microlites des feldspaths, augites, etc. ; des granules opaques rendent par leur nombre l'ensemblé de la coupe opaque. Toutefois, les granules se voient parfaitement individualisés sur une coupe très mince observée à un fort grossissement ; ils sont de forme carrée, parfois d'apparence octaédrique de 5 à 10 μ de côté généralement ; ce sont des oxydes de fer avec titane et parfois manganèse. Il semble évident que la formation des feldspaths et pyroxènes précipite un oxyde de fer qui n'entre ni dans la molécule du pyroxène ni dans celle des autres composés. Toutes

(1) L'auteur appelle macro-cristaux ceux qui atteignent au moins un cinquième de millimètre de diamètre.

les laves traverseraient, dans leur évolution, une phase au cours de laquelle se précipiterait du protoxyde de fer libre. Le nom de « Iozite » a été donné au protoxyde de fer libre et celui générique de « Iozites » aux oxydes libres dont le titre en protoxyde est bien supérieur à celui exigé par la formule Fe^3O^4 . Les iozites les plus pures titreraient 77 à 85 % de protoxyde.

La magnétite n'est donc pas, d'après ce géologue, le constituant magnétique unique des roches volcaniques. Il admet l'existence d'un oxyde magnétique et magnétipolaire auquel il donne le nom de iozite. Vu la petitesse des cristaux d'iozite, ceux-ci n'ont pas encore été isolés.

Recherches personnelles. — Nos prédécesseurs ont mesuré souvent une aimantation dans un champ quelconque qui ne donne ni le coefficient d'aimantation initial, ni la saturation. Nous avons essayé de faire mieux en nous attaquant à deux constantes définies : la saturation et le point de Curie.

Pour obtenir l'aimantation spécifique à saturation de nos échantillons, nous avons dû utiliser un champ magnétique de l'ordre de 12.000 gauss. Des essais faits avec un champ de 7.500 gauss donnèrent des valeurs inférieures de 5 %.

L'appareil utilisé est un appareil à translation décrit par MM. G. Foëx et F. Forrer (1), dérivant de celui qui a été utilisé par MM. Weiss et Foëx en 1911, à la mesure des coefficients d'aimantation des substances ferro-magnétiques. La méthode de mesure est celle

(1) G. FOEX et R. FORRER : *Journal de Physique*, t. VII, s. VI, n° 6. *Sur un appareil sensible pour la mesure précise des coefficients d'aimantation à diverses températures*, p. 180.

de Faraday (attraction dans un champ non uniforme). Une masse m_1 , d'une substance dont le coefficient d'aimantation est χ_1 , prend dans une région où l'intensité moyenne du champ est H , un moment magnétique égal à

$$m_1 \chi_1 H$$

Le champ n'étant pas uniforme, la substance tend à se déplacer dans la direction du gradient du champ ; elle est soumise dans cette direction à la force :

$$f_1 = m_1 \chi_1 H \frac{\delta H}{\delta x}$$

On mesure la force f_1 , on remplace la substance par un corps de comparaison occupant exactement la même portion de l'espace dans le champ ; on mesure la force f_2 exercée sur le corps de comparaison :

$$f_2 = m_2 \chi_2 H \frac{\delta H}{\delta x}$$

$$\text{On en déduit : } \chi_2 = \chi_1 \frac{f_2}{f_1} \frac{m_1}{m_2}$$

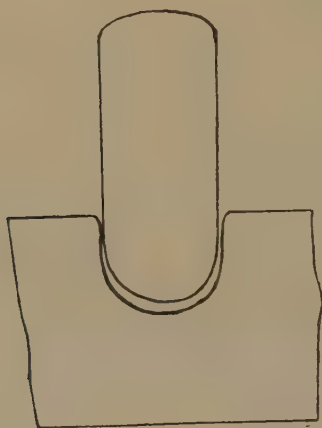
Un dynamomètre à bobine très légère et à aimant permanent sert à la mesure des forces.

Un dispositif de lecture au miroir permet d'obtenir, en même temps qu'une amplification, considérable, une stabilité suffisante du spot.

Nous avons fait quatre parts de chaque échantillon dont le poids était voisin de 500 grammes. Chaque part a été finement pulvérisée et intimement mélangée et un prélèvement variant entre 25 et 100 milligrammes était étudié.

Nous ne pouvions songer à réduire en poudre une si grande quantité de roches en utilisant un mortier de porcelaine ou même d'agate. Nous étant procuré

un bloc de fibrolite (1) ($\text{Al}^{16} \text{Si}^8 \text{O}^{48}$) et une plaque épaisse d'agate du Brésil, nous avons fait réaliser, suivant nos indications, à la taillerie de Royat, un pilon de fibrolite et un mortier d'agate qui ont résisté



à toutes les épreuves que nous leur avons fait subir. En frappant, à l'aide d'un petit maillet de bois, sur le pilon que l'on tourne graduellement autour de son axe, on réduit très rapidement en poudre les basaltes les plus durs.

Nous avons employé, comme substance-étalon, la magnétite, dont l'aimantation à saturation a été déterminée par Kopp (2)

et trouvée égale à 92,7 unités absolues.

La magnétite était diluée dans du verre pilé pour occuper un volume du même ordre de grandeur que celui de la substance à étudier.

Nous donnons ci-après les valeurs de l'aimantation à saturation trouvées sur nos échantillons :

(1) La fibrolite est remarquable par sa tenacité qui l'a fait rechercher par les hommes de la pierre polie pour la fabrication de leurs armes. On trouve fréquemment des hachettes en fibrolites sur divers plateaux basaltiques qui dominent la vallée de l'Allier.

(2) KOPP, *Thèse Zurich* 1919.

LIEU DE PROVENANCE	BASALTES	DIVERS
<i>Chaîne des Puys</i>		
Puy de Chalard	2,94	
— de Verrières		1,37 Trachyte amphibolique.
— de la Raviole		1,77 Labradorite.
— de la Bannière	1,97	
— de la Nugère		2,32 Andésite.
— —		0,71 —
— de Louchadière		0,43 Domite.
— —		1,27 Scorie basaltique.
— —		1,25 Labradorite.
— de Jumes	2,82	
— —	2,80	
— de Coquille	2,65	
— de Leyronne		1,14 Domite.
— —		3,35 Trachyte euritique.
— de Chopine		0,34 Domite.
— —	2,42	
— des Gouttes	2,42	
— de Chanaat		0,20 Périodot.
— —	2,98	
— —		1,50 Andésite.
— de Lantégy		2,01 —
— du Petit Sarcouy		2,65 Labradorite.
— Sarcouy		0,18 Domite.
— de Pariou		1,09 Andésite.
— des Goules	1,49	
— —		0,50 —
— de Cliezou		0,07 Domite.
— de Côme		1,43 Labradorite.
— —		3,99 Andésite.
Petit puy de Dôme	0,44	
Puy de Dôme		0,68 Fer oligiste.
— —		0,08 Domite.
— —		0,81 Labradorite.
Grand Sault et petit Sault	1,40	
Puy des Gromanaux		0,51 Trachyte domitique.
— Besace	0,37	
— de Salomon		0,69 Domite.
— —	4,75	
— de Montchié		2,03 Andésite.
— —		1,83 Téphrite.
— de Barne		4,39 Labradorite.
— de Laschamps	0,50	
— Pela	4,45	
— Montchar	3,36	
— Coeusset		1,04 Domite amphibolique.
— de Mercœur	1,92	
— Noir	2,18	
— —		2,65 Scories basaltiques.
— de la Vache	2,40	
— —	1,14	
— —	2,28	
— de Burcharet	1,32	
— de Tartaret	1,02	
— —	0,83	
— —	(à Neschers)	
— —	2,27	
— —	(à St-Nectaire)	
— —	2,43	
<i>Ardes et ses environs</i>		
Ternant	1,26	
Saint-Alyre	1,74	

LIEU DE PROVENANCE	BASALTES	DIVERS
<i>Ardes et ses environs (suite)</i>		
Puy de Zanières	1,52	
— Leyranou		2,07 Dolérite.
— —	1,85	
Rentières		0,20 Péridot (violet).
— —		0,18 — (vert).
— —	1,44	
Volcan de Mazoires	0,65	
<i>Besse et ses environs</i>		
Chomeilles	2,85	
— —	2,22	
Jassat		2,55 Trachyte.
Mareuges		3,76 Téphrite.
Puy de Bessoles	1,33	
Beaune		2,80 Trachyte.
Varennes	2,07	
Le Vernet	3,19	
Pied E de Bessoles, près du Treuil		
Saint-Diéry	1,30	
Valbelex	2,55	
	(très	
	péridotique)	
Vallée de Compains	1,41	
Volcan de Montchal	1,53	
Puy de Montaineyre	2,79	
Egliseneuve, Pré de la Croix Marriol	1,76	
Charrère		2,86 Andésite.
— —		1,70 Trachy-Andésite.
Puy de Pertuisat	4,21	
	andésitique	
Lac Pavin	1,72	
— —	andésitique	
— —	1,20	
Puy de Serveix	4,36	
	limburgitique	
— de Chambourguet	3,74	
Vallée de Chaudefour-Saint-Vercingétorix		0,89 Trachy-Andésite.
		Trachyte.
Vallée de la Rancune		3,70 Enclave.
— —		0,83 Andésite.
— —		1,04 Trachyte.
Dyke du Portail		0,63 —
Vallée de Chaudefour		1,81 Projections cinéritiques
		d'andésite.
Cascade de Pérouze		3,34 Andésite.
— —		0,41 Scories d'andésite.
— de Labiche	2,61	
— —	0,94	
Vallée de Chaudefour-s.-Sainte-Anne		1,40 Andésite.
— —		1,72 Trachyte.
Rocher de l'Aiguille		1,68 —
Couleyre de Besse		2,50 Andésite.
— —		2,10 —
Fontaine de l'Oiseau		2,86 Labradorite.
Haut du Chapial		0,50 Andésite.
Ravin du Chapial		0,02 Trachyte.
Pérouze		0,34 Cinérites d'andésite.
Montmie		0,43 Trachyte.
Ravin de Boël		1,54 Scorie andésitique.
— —		1,58 —
— —		1,48 Trachyte.
— —		0,40 —

LIEU DE PROVENANCE	BASALTES	DIVERS
<i>Besse et ses environs (suite)</i>		
Ravin de Boël		0,19 Trachyte.
Crête du Coq		1,09 —
Grande coulée entre Chapial et l'Aiguille..		0,10 —
<i>Billom et environs</i>		
Puy de la Croix	1,00	
<i>Champeix et environs</i>		
Puy de la Velle	2,05	
— de Bryonnet	2,74	
Mont-Cornadore	3,08	
Puy d'Allou	3,57	
—		5,87 Enclave.
—		3,00 Andésite.
—		9,20 Enclave.
Sommet du Bonhomme	1,70	
<i>Clermont et environs</i>		
Côtes de Clermont	2,90	
Plateau de Chanturgues	0,95	
Saint-Genès-l'Enfant	1,38	
Plateau de Mirabelle	1,11 prismé	
Puy de la Poix		0,13 Pépérite compacte.
— de Marmant	1,99	
— de Corent	0,95	
—	2,45	
—	0,23	
—		5,00 Fer titané.
Montaudou	0,42	
—	0,75	
Puy de Montrognon	1,21	
Puy de Chaumontaix		0,69 Domite.
— Dulin	0,63	
Plateau de Gergovie	0,80	
— —	andésitique	
—	1,79	
Puy Giroux	3,70	
—	2,77	
Petit puy de Marmant d'Orcet	2,77	
Gravenoire-Boisséjour	3,41	
— —	limbugitique	
— Aubière	2,45	
—	à enclaves de grains de quartz petits et nombreux	
—	1,94	
— —	labradoritique	
— Beaumont		0,36 Scories basaltiques.
Puy de Charade	1,84	
— de Berzet	3,16	
Cap de Prudelles	3,17	
—		0,18 Périidot olivine.
Puy de Montrodeix	1,65	
— de Mouillebout	1,90	
<i>Combronde et environs</i>		
A l'Orthagnat	1,66	
<i>Cunhat et environs</i>		
Vindiolet	0,25	

LIEU DE PROVENANCE	BASALTES	DIVERS
<i>Issoire et environs</i>		
Entre Coudes et Parent	0,25	
Tour de Boulade	1,63 prismé	
Puy de Teillet	1,14	
Saint-Babel		2,42 Téphrite.
Bergonne		1,35 Dolérite.
Le Broc	1,64	
Puy d'Isson ou de Solignat.....	1,04	
—	1,40	
Perrier.....	2,13	
<i>Manzat et environs</i>		
Champelbost	1,71	
Gour Tazena		1,70 Trachyte.
—		1,25 Scories basaltiques.
<i>Pontaurmur et environs</i>		
Puy d'Eddes	1,58	
<i>Pont-du-Château et environs</i>		
Pic de Dallet	0,59	
Puy de Mûr	1,57	
<i>Pontgibaud et environs</i>		
Plateau de Landines	3,16	
Volcan de Chaluset		2,59 Scories bleues basaltiques.
—		2,61 — noirâtres.
<i>Rochefort et environs</i>		
Ceyssat		1,89 Andésite.
Allagnat		3,98 —
—		
Lac d'Aydat	2,74	
—	3,97	
—	3,81	
Saint-Bonnet	3,33	
Puy de Vivanson	2,77	
Roche Malviale	0,67	
Puy de l'Aiguillier		2,03 Trachyte porphyroïde.
Laqueuille	1,72	
Cascade de Trador		2,65 Andésite.
Lestombe et Trador		0,47 Phonolite.
Lestombe	2,58	
Puy de Banson	2,17	
— de la Vialle	3,67	
— de Neuffont	0,78	
<i>Saint-Amant-Tallende et environs</i>		
Saulzet-le-Froid	2,55	
Font-Marcel	2,50	
Espinasse	2,74	
Puy de Saint-Sandoux		0,81 Dolérite.
—	3,06	
—	1,24	
—	1,37	
Mareuge.....		0,24 Enclave dans téphrite.
Saignes.....		4,05 Enclave.
Saint-Saturnin		1,37 Cinérites.
Entre Mareuge et Saignes		2,38 Enclave.
		2,73 Andésite.
Puy de Saignes.....		2,73 Enclave.

LIEU DE PROVENANCE	BASALTES	DIVERS
<i>Saint-Anthème et environs</i>		
Dyke	1,16	
Carrière de Chouzet	2,03	
<i>Saint-Dier et environs</i>		
Puy de Cordelou		1,78 Téphrite.
<i>Vic-le-Comte et environs</i>		
Environs de Vic-le-Comte		
Mirefleurs	1,43	
Puy Saint-André	1,57	
— —	labradoritique	
— —	1,06	
Saint-Georges-es-Allier	2,54	
Puy Saint-Romain		0,07 Pépérite.
— —	0,57	
— —	0,98	
— Saint-Hippolyte	1,45	
— d'Ecouyat	3,45	
— de Buron	1,16	
<i>Mont-Dore et environs</i>		
Cascade de Quereuilh	1,73	
Plateau de Langle		2,05 Trachy-andésite.
— —		2,94 Trachyte.
Roc blanc		2,70 Andésite.
— —		2,95 Phonolite.
Roche Thuilière		1,95 —
— Sanadoire		1,60 —
Croix Morand	0,83	
Puy de Mareilh		0,15 Andésite.
— —		1,04 Phonolite.
Col entre le puy de Langle et Mareilh		1,89 Perlite de sanoyite.
Chuquet Claude		0,69 Cinérite.
— —		0,56 Phonolite.
Puy du Barbier	0,74	
— d'Hautechaux	0,54	
— de Mône		0,44 Trachy-porphyroïde.
— de Surin		1,34 Trachyte.
— de la Tâche		0,72 Fer oligiste.
— —		0,14 Trachyte.
— —		0,72 —
— de Diane		1,17 —
Route de Latour		1,69 Labradorite.
— —		0,90 —
Cascade du Mont-Dore		2,68 Trachyte.
Vouassière		2,55 Trachy-andésite.
— —		0,57 Trachyte.
Font-Pique		1,16 —
Les Egravats		1,70 —
Roc de Cuzeau		Andésite.
— —		2,25 Trachyte.
— —		1,78 —
Puy Ferrand		1,98 —
— de la Perdrix		0,11 —
— de Pailharet		2,77 Trachy-porphyroïde.
Pic du Capucin		0,20 Trachyte.
— —	0,50	
— —		1,44 Labradorite.
Puy Redon ou puy de Clujade	0,94	

LIEU DE PROVENANCE	BASALTES	DIVERS
<i>Mont-Dore et environs (suite)</i>		
Chastreix		0,92 Andésite.
—		0,74 —
—		1,51 Trachy-andésite.
Genestoux		1,46 Phonolite.
Salon de Mirabeau		1,46 —
—		0,06 Cinérites trachytiques.
—		0,28 Trachyte.
Le Pessy		1,30 —
Rigolet		2,36 Trachy-andésite.
Ravin de l'Usclade		0,26 Rhyolite.
La Bourboule		0,76 Trachyte.
Rocher de l'Aigle		2,62 Phonolite.
Murat-le-Quaire		1,63 —
—		3,48 Labradorite.
—	1,67	
Pailloux		0,56 Trachyte.
Légal		0,31 Phonolite.
Banne d'Ordanche	3,78	
—		0,63 —
Fille de la Banne	1,73	
Puy de Cacadoigne		0,05 Domite.
—		1,17 Trachyte.
—		2,40 Andésite.
—		2,89 —
—	0,40	
Vallée des Enfers		1,96 Andésite.
—		1,76 Trachyte.
—		1,60 —
—		1,06 —
—		1,32 —
—		1,43 —
—		1,40 —
—		0,22 —
—		1,36 —
Source des Enfers		
Ravin de la Craie	0,42	
Puy de la Grange		2,30 —
Vallée de la Cour		0,20 —
—	3,76	
Plateau de Rigolet		4,73 —
Puy de Durbize		2,07 Andésite.
Riveau-Grand		1,52 Trachyte.
—		1,03 —
Petit-Riveau		0,52 Andésite.
Puy de Manson	1,53	
— Gros	1,48	
—		2,30 Trachyte.
—		1,14 —
— de la Védrine		1,24 Phonolite.
Cirque de Prégnieux, Rocher de l'Aigle	2,70	
Plateau de Durbize		
Channeau	1,78	
Vallée de Chanoux	2,54	
		1,58 Cinérites.

Les plus fortes valeurs de σ sont données par des enclaves, nous avons trouvé 9,20 pour une enclave dans l'andésite du puy d'Allou, soit le dixième de l'aimantation de la magnétite ; 8 échantillons seulement ont une aimantation supérieure à 4 unités ; les autres échantillons, une aimantation inférieure. Les valeurs trouvées pour σ sont assez variables, non seulement suivant les régions, mais au sein même d'une coulée : 3 échantillons de basalte du puy de Corent donnent respectivement pour valeur de σ , 0,95, 2,45 et 0,23 unités ; deux échantillons de même aspect de la coulée de Gravenoire prélevés, l'un à Boisséjour, l'autre à Beaumont, donnent 3,41 et 2,45. On ne saurait attribuer ces différences à la variation de constitution qui se manifeste à partir de la couche scoriacée quand on descend dans la profondeur, cette couche scoriacée a, en général, disparu (érosion) et les échantillons ont été pris dans un basalte homogène.

Nous avons mesuré l'aimantation à saturation des minéraux constitutifs principaux des roches volcaniques.

La valeur σ trouvée pour divers échantillons de péridot prélevés en divers points du département, est remarquable par sa constance.

Péridot (violet),	puy de Chanat	0,20
—	— Rentières	0,20
— (vert),	Rentières	0,18
—	— Cap de Prudelles	0,18

Grâce à l'exquise bienveillance de M. A. Lacroix, nous connaissons les teneurs en FeO et Fe²O³ d'un certain nombre d'échantillons, ainsi que l'analyse complète de cinq d'entre eux.

DESIGNATION DES ROCHES		FeO	Fe ²⁺ O ³	σ	Rapport FeO/Fe ²⁺ O ³	Rapport σ/Fe ²⁺ O ³
1. Basalte labradoritique.....	Puy Saint-André....	7,84	1,38	1,57	5,68	1,14
2 — —	Gravenoire	8,48	2,29	1,94	3,70	0,85
3. Andésite amphibolique oligoclasique.....	Cratère de la Nugère	3,62	2,98	2,32	1,21	0,78
4. Perlite de sanoyite	Col entre le puy de Langle et Mareuïh	2,21	2,45	1,89	0,90	0,77
5. Basalte andésitique	Puy de Pertuisat ..	3,90	5,79	4,21	0,67	0,73
6. Andésite oligoclasique à hornblende.....	— Pariou	3,51	1,87	1,09	1,88	0,58
7. Basalte porphyrique ankaramitique		8,54	3,49	1,84	2,45	0,53
8. — andésitique	Lac Pavin	6,55	3,87	1,72	1,69	0,44
9. Basanitoïde.....	Plateau de Charlanne	7,39	5,08	2,07	1,45	0,41
10. Basalte andésitique passant à basanitoïde	Col du Tartaret.....	6,35	6,26	2,43	1,01	0,39
11. Ankaramite	Plat. columnaire au- dessus de Clermont	6,00	7,31	2,10	0,82	0,29
12. Basalte andésitique	Merdogne-Gergovie..	6,81	3,54	0,80	1,92	0,23
13. Andésite oligoclasique	Volvic	3,69	3,14	0,71	1,14	0,23
14. — augitique.....	Fontfreide	3,51	5,90	1,13	0,60	0,19

Nous avons également l'analyse complète et les résultats de l'examen minéralogique de cinq échantillons choisis parmi les précédents :

	(3) Andésite amphi- bolique Cratère de la Nugère	(5) Basalte andé- sitique Puy de Pertuizat	(9) Basani- toïde Plateau de Charlanne	(11) Ankara- mite Plateau columnaire au-dessus de Clermont	(12) Basalte andé- sitique de Gergovie
SiO ²	57,80	48,80	42,30	43,18	45,74
Al ² O ³	17,18	14,65	14,10	9,86	13,24
Fe ² O ³	2,98	5,79	5,08	7,31	3,54
FeO	3,62	3,90	7,39	6,00	6,81
Mno.....		0,29			
Mgo	1,90	6,26	6,45	11,56	8,99
CaO	5,74	9,18	14,30	11,32	9,64
Na ² O.....	5,11	4,17	3,22	2,24	2,51
K ² O	3,24	2,61	1,53	1,19	2,38
TiO ²	1,70	3,20	4,80	3,58	3,61
P ² O ⁵	0,48	0,44	0,41	0,71	0,47
H ² O + ...		0,18	0,27	2,07	2,79
H ² O —	0,43	0,36	0,49	1,27	0,23
Cl.....		0,17			
CO ² -S et SO ³					
Augite.....		Beaucoup	Beaucoup	Beaucoup	Beaucoup
Olivine.....		—	Peu	—	—
Plagioclase ...	Beaucoup	—	Beaucoup	—	—
Magnétite....	Peu	—	—	Magnétite	Ilménite
Verre.....	Verre			Verre	Beaucoup
σ	2,32	4,21	2,07	2,10	0,80

Pour interpréter les résultats du tableau (page 110), notons que le nombre de molécules de Fe^2O^3 est toujours inférieur au nombre de molécules de FeO . Dans l'ignorance où nous sommes de la répartition de FeO , faisons l'hypothèse simple que tout Fe^2O^3 figure dans la magnétite et par suite que l'excès de FeO est dans les silicates, nous pourrions aisément rapporter l'aimantation σ à la magnétite contenue dans la roche.

Il y a lieu de noter que la composition virtuelle (1) de nos échantillons se rapproche d'une composition possible qui est réalisée par le procédé de cristallisation le plus simple, celui de la fusion ignée (formation des laves).

Nous signalons les valeurs très variables du rapport $\text{FeO}/\text{Fe}^2\text{O}^3$ sans y insister, FeO entrant en proportions différentes dans les minéraux constituants. Quant au rapport $\sigma/\text{Fe}^2\text{O}^3$, il varie dans de très larges limites (1,14 à 0,19). D'autre part, la quantité de magnétites vues au microscope ne correspond pas à la quantité que devrait fournir le peroxyde dosé (page 111). En conséquence, la présence de constituants magnétiques, autres que la magnétite, paraît probable.

Recherches sur les points de Curie des roches. — *Définition du point de Curie.* — On appelle point de Curie d'une substance, la température à laquelle disparaissent ses propriétés ferromagnétiques.

Effectuons le chauffage d'une roche naturelle, c'est-à-dire d'un corps d'une composition en général complexe et le plus souvent inconnue, même si on suppose une analyse centésimale faite avec soin. Les

(1) A. LACROIX : *Minéralogie de Madagascar*, t. II. *Classification lithologique*, p. 221 et suivantes.

propriétés magnétiques de l'ensemble doivent être considérées comme la superposition des propriétés magnétiques d'un certain nombre de constituants définis ; la courbe qui représente l'aimantation de l'ensemble se comporte, à partir d'une certaine température, comme une fonction constamment décroissante de la température t .

Portons t en abscisses et σ (aimantation) en ordonnées. Lorsque la température, en s'élevant graduellement, passe par le point de Curie de l'un des constituants dont il vient d'être question, l'ordonnée de la courbe $\sigma = f(t)$ subit une chute brusque en passant par un point d'inflexion à tangente sensiblement verticale.

Inversement toutes les fois que la courbe $\sigma = f(t)$ présentera un point d'inflexion à tangente verticale et que cette courbe est réversible, l'abscisse de ce point d'inflexion décelera le point de Curie. Le problème qui restera à résoudre, et qui n'est pas des plus simples, est la recherche du constituant auquel on doit attribuer le point de Curie en question. Poser une telle question n'est pas nécessairement la résoudre, le nombre des points de Curie des corps ferromagnétiques étudiés jusqu'ici étant assez limité.

Pour étudier les variations de l'aimantation de nos échantillons en fonction de la température, nous avons réalisé le dispositif expérimental ci-après (fig. p. 114).

Un levier est mobile autour d'un fil de torsion *horizontal* l , en l'espèce un ruban métallique m constamment tendu par un ressort r et porté à chaque extrémité par un bouton B qui permet le déplacement du levier. Ce dernier est constitué par un anneau métallique solidaire du ruban en son milieu et dans lequel est engagé : à sa partie supérieure, un tube de quartz t porteur de

nickel (380°), de la magnétite (580°) et du fer (758°).

L'ampoule est dans la région non uniforme du champ d'un aimant permanent en fer à cheval donnant 300 gauss.

Nous avons utilisé trois ampoules différentes : une ampoule ouverte de quartz, une ampoule de pyrex scellée pour les échantillons sur lesquels nous avons tenu à faire au préalable un vide très poussé à la trompe à mercure (dans ces deux cas, les fils du couple traversent le bouchon de stéatite), enfin une ampoule en argent, cylindre d'argent de 7 mm. de diamètre et 12 mm. de longueur, présentant sept cavités cylindriques de 1 mm. de diamètre. Ce cylindre se visse sur un anneau coiffant le tube de quartz et auquel sont soudés les deux fils du couple, entourés en spirale au-dessous du ruban métallique et aboutissant à deux bornes *b* fixées sur une plaquette d'ébonite solidaire du support du ruban métallique. L'ampoule a été évidée le plus possible pour diminuer son poids. On conçoit que la substance à étudier en contact avec l'argent (très conducteur de la chaleur), sous une faible épaisseur, soit exactement à la température repérée par le couple.

Le levier porte un miroir concave *m* qui renvoie les rayons lumineux issus d'une source sur une échelle verticale où sont lues les déviations dues aux variations d'aimantation.

Ce système se prête directement à l'enregistrement photographique. Le faisceau lumineux, issu d'une source ponctuelle (filament vertical d'une lampe et fente horizontale) est reçu par le miroir concave de l'appareil, réfléchi sur une glace ordinaire placée à une courte distance en avant, réfléchi à nouveau sur le miroir d'un galvanomètre relié au couple d'Imphy. L'image ponctuelle obtenue trace sur un papier photographique la

courbe de variation de l'aimantation en fonction de la température.

Etude des échantillons ayant une aimantation à saturation supérieure à 4 unités.

Les échantillons dont l'aimantation à saturation est supérieure à 4 unités, donnent tous un point de Curie au voisinage de 550° (voir page 118), donc voisin de celui de la magnétite-étalon, sauf l'un d'eux qui donne le point $\Theta = 580^{\circ}$; c'est une enclave assez fréquemment trouvée dans l'andésite du puy d'Allou ; cet échantillon, pour lequel nous avons trouvé $\sigma = 9,2$, renferme donc 10 % de magnétite dont la séparation a été obtenue très facilement à l'aimant. Deux échantillons (basalte, puy Pela) et (basalte, puy de Salomon) présentent en plus du point $\Theta = 550^{\circ}$, un point de Curie $\Theta = 200^{\circ}$ nettement apparent sur le premier.

Le point $\Theta = 550^{\circ}$ a été trouvé par Hilpert pour une magnétite naturelle. Il y aurait évidemment lieu de faire des analyses chimiques très précises sur des échantillons de magnétite naturelle donnant des points de Curie différents. Peut-être y trouverait-on quelques traces d'oxydes (chaux, magnésie, etc.) qui, en solution solide dans la magnétite, expliqueraient ces faibles différences observées. Trois échantillons de magnétite naturelle nous ont toujours donné 580° .

Quant au point de Curie de 200° , nous l'avons observé assez fréquemment sur les courbes obtenues avec d'autres échantillons.

Etude des échantillons du Muséum.

Nous observons sur les courbes caractéristiques des échantillons du Muséum, une gamme de points de Curie allant de 100° à 600° . Reprenant les indications du tableau de la page 116, nous allons le compléter par les

valeurs du rapport $\sigma/\text{Fe}^3\text{O}^4$ (1) et les indications des points de Curie (page 122). Il ressort du tableau de la page 122 que la gamme des points de Curie varie dans de larges limites. Si nous considérons, en particulier, le groupe des échantillons 2, 3, 4, 5 caractérisés par un point de Curie de 550° , un autre point de Curie apparaît à l'échantillon n° 2 où le rapport $\text{FeO}/\text{Fe}^2\text{O}^3$ est notablement plus élevé que pour les autres échantillons.

Nous observons la disparition *complète* de l'aimantation de certains échantillons à une température relativement peu élevée (au voisinage de 200°). La composition minéralogique de ces échantillons n'indique pas de constituants ferro-magnétiques, à part ceux que l'on observe comme magnétite ou ilménite. L'augite, l'amphibole, l'olivine..., ne donnent une valeur de l'aimantation appréciable, mais toutefois relativement faible, que dans les champs très forts.

Le magnétisme des roches volcaniques n'est donc pas dû généralement à la magnétite pure.

Influence de chauffage successifs.

Dans un champ magnétique de 300 gauss, nous avons étudié l'influence d'une série de chauffages rapides (20 minutes), suivis d'un refroidissement de même durée, sur les cinq échantillons, nos 3, 5, 9, 11, 12 (voir pages 120 et 121). Ces échantillons, réduits en poudre, sont enfermés dans une ampoule de pyrex dans laquelle on a fait le vide. Les courbes de deuxième, troisième, quatrième chauffages sont très voisines les unes des autres et d'allure nettement différente de celle de la première courbe dans les deux premiers échantillons

(1) La valeur adoptée pour Fe^3O^4 est tout à fait hypothétique. Nous comparons σ à la quantité maxima possible de la magnétite résultant de la quantité connue des deux oxydes.

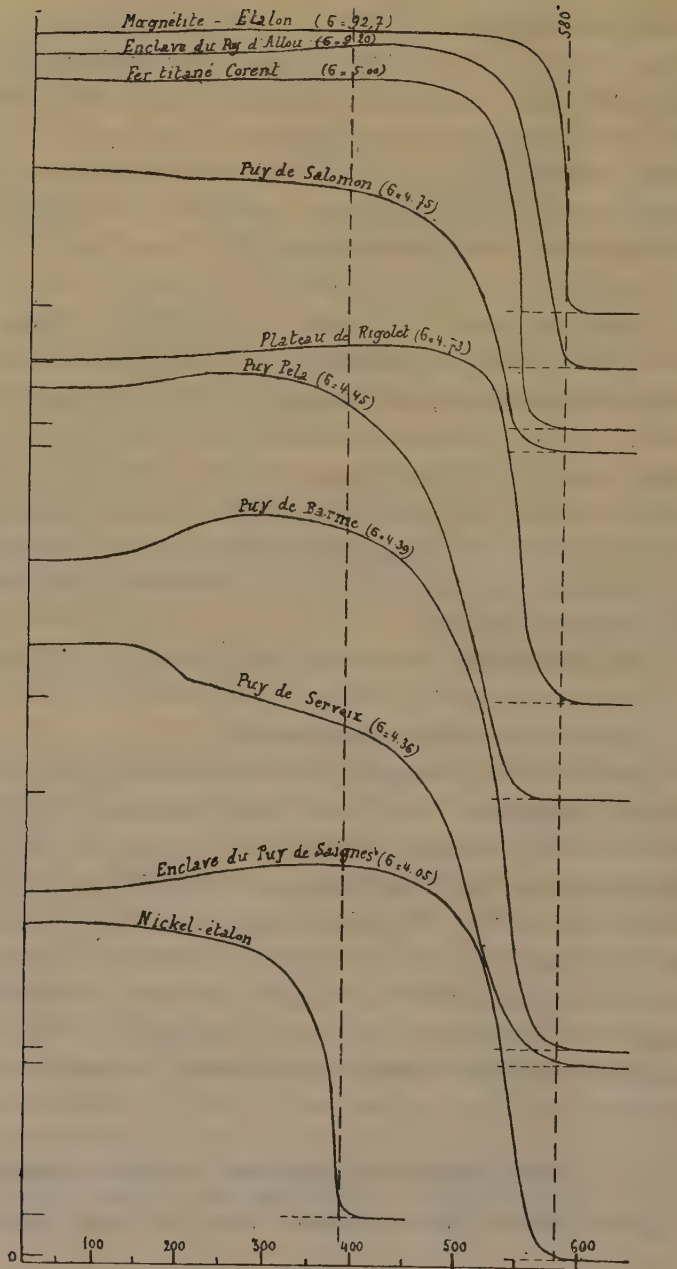


FIG. N° 9

(3 et 5). Ces courbes présentent quelques points d'inflexion. Les courbes de deuxième et troisième chauffage des échantillons 9 et 11 présentent les mêmes points d'inflexion que celles du premier chauffage, mais diversement accusés. Il y a lieu de remarquer spécialement que l'amplitude de la portion de courbe qui correspond au point de Curie le plus bas, est considérablement accrue au deuxième chauffage.

A 460°, l'ampoule renfermant l'échantillon n° 12 a été brisée et pulvérisée, ce qui correspond à un point de transformation de la substance. Nous avons alors poussé le chauffage à 350° seulement sur les échantillons 9 et 12, où la disparition à peu près entière du magnétisme a lieu à une température assez basse et avons obtenu, au refroidissement, une courbe réversible se reproduisant au second chauffage.

D'autre part, nous avons mesuré l'aimantation à saturation et avons retrouvé la valeur primitive.

Echantillons d'une même coulée.

Nous avons observé, au sein d'une même coulée, des valeurs très variables de l'aimantation à saturation. Nous donnons ci-après les courbes d'aimantation en fonction de la température de deux échantillons prélevés en deux points éloignés d'une même coulée bien connue, la coulée de Gravenoire. L'un d'eux est prélevé à Boisséjour, au pied même de la coulée, l'autre à Aubière. Ces courbes ont même allure et présentent toutes deux un point de Curie très accusé vers 200°.

Des recherches pourraient être faites sur un grand nombre d'échantillons judicieusement choisis au sein d'une même coulée.

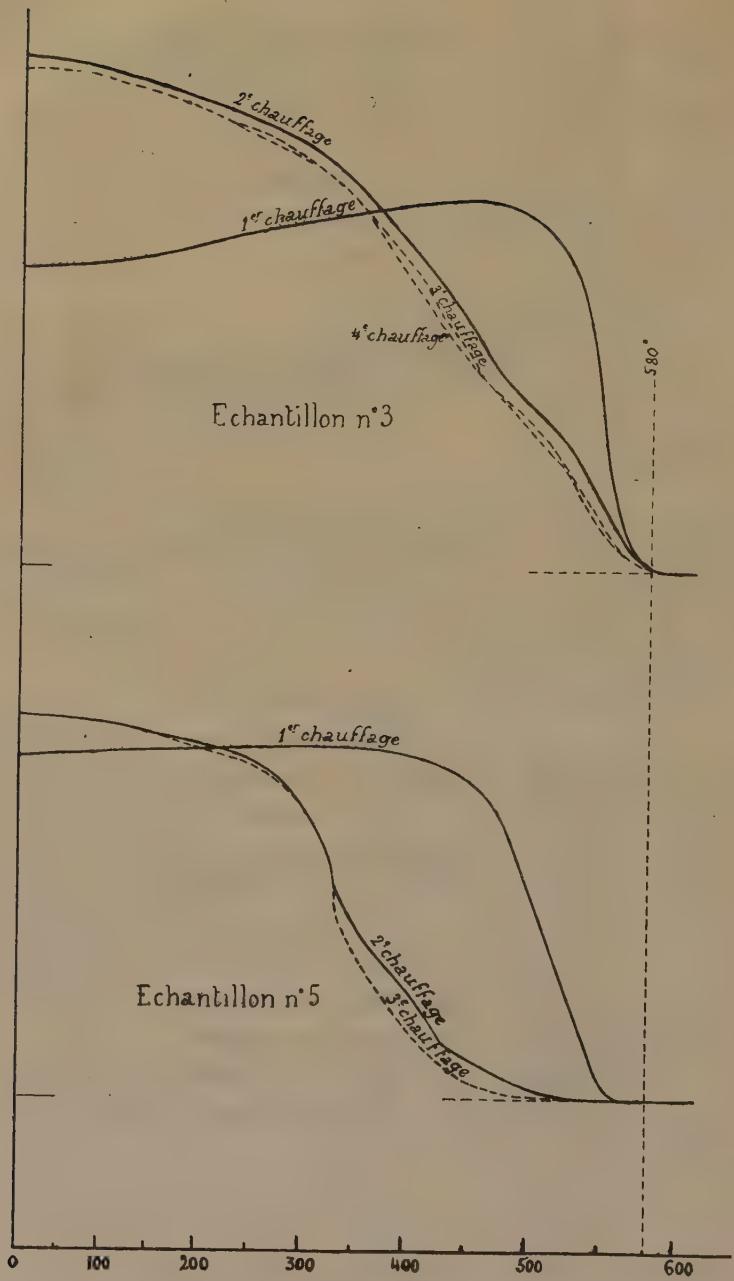


FIG. N° 10

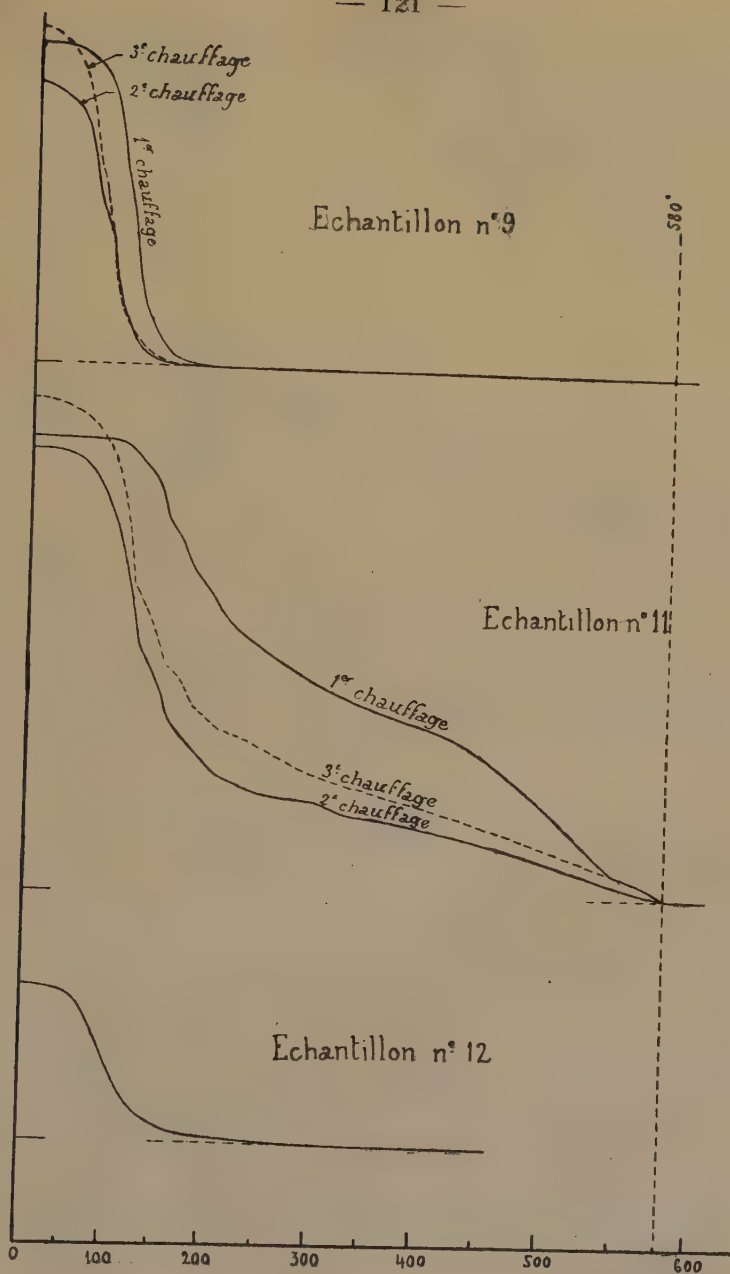


FIG. N° 11

Nos d'ordre	NOMS DES ÉCHANTILLONS	σ	$\text{FeO}/\text{Fe}^{2+}$	σ/Fe^{2+}	Θ	
1	Basalte labradoritique	1,57	5,68	0,79	250°	500°
2	—	1,94	3,70	0,58	150°	550°
3	Andésite amphibolique oligoclasique.....	2,32	1,21	0,54		550°
4	Pelite de sanoyite	1,89	0,90	0,53		550°
5	Basalte andésitique.....	4,21	0,67	0,50		550°
6	Andésite oligoclasique à hornblende.....	1,09	1,88	0,40		525°
7	Basalte porphyrique ankaramitique ...	1,84	2,45	0,36	250°	525°
8	— andésique	1,72	1,69	0,31	200°	500°
9	Basanitole.....	2,07	1,45	0,28	100°	200°
10	Basalte andésitique passant à basanitole	2,43	1,01	0,27	100° 150°	200°
11	Ankaruite	2,10	0,82	0,20	150°	200°
12	Basalte andésitique.....	0,80	1,92	0,16	100° 150°	200°
13	Andésite oligoclasique.....	0,71	1,14	0,16		600°
14	— augitique	1,13	0,60	0,13	250°	550°

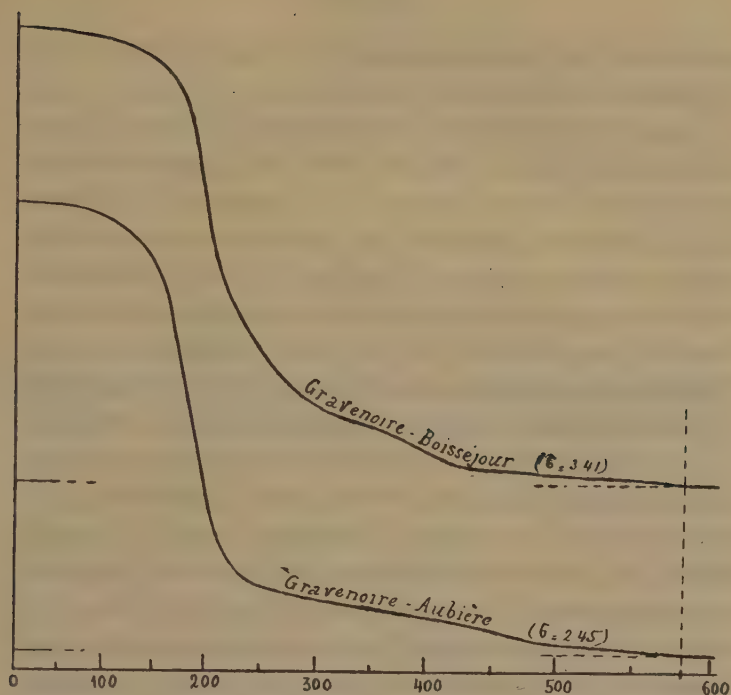


FIG. N° 12

Si nous suivons les variations de l'aimantation en fonction de la température de nos substances chauffées non dans un vide très poussé, mais à l'air ou dans un courant de CO^2 , aucune interprétation n'est alors possible ; les courbes de second chauffage des échantillons nos 9, 11 et 12 qui se rapprochaient de l'axe des ordonnées, s'en éloignent notablement et la valeur de l'aimantation à saturation de ces échantillons, après le second refroidissement, s'est accrue sensiblement.

Il serait imprudent de relever des points de Curie sur les courbes de H Takagi. La détermination par point de ces courbes demande un temps assez long pour chaque échantillon étudié et l'influence d'oxydations

partielles joue un grand rôle. Le facteur temps peut lui aussi intervenir.

Lœwinson et Turcev constatent des minima d'aimantation vers 200°, 400° et 700°. Ces minima doivent correspondre à nos courbes de deuxième chauffage ; ils sont souvent différents des points de Curie observés sur la courbe de premier chauffage, la seule qu'il importe de retenir ou plutôt qui semble renseigner sur la nature magnétique primitive de la roche. Les minima de 400° et 700° correspondent peut-être à un ferrite de magnésie qui pourrait exister au sein du constituant magnétique.

Des expériences mentionnées à la troisième note, les auteurs dégagent la conclusion possible que la capacité d'aimantation des roches dépend de leur traitement thermique antérieur et que les chauffages réitérés suivis de refroidissement augmentent ces capacités d'aimantation. Il semble bien qu'il n'en soit pas toujours ainsi, l'aimantation à saturation ayant été trouvée souvent inférieure à sa valeur primitive après le traitement thermique.

Lœwinson et Turcev admettent la possibilité que des composants dépourvus d'aimantation permanente forment une substance douée d'une certaine polarité. L'expérience suivante tend à prouver que cette hypothèse n'est pas valable.

Partant d'un échantillon remarquable par ses points de Curie relativement bas (échantillon n° 9), nous avons laissé séjourner, durant deux semaines, cette roche réduite en poudre très fine, dans une solution saturée de potasse caustique. La partie non dissoute a donné exactement la même courbe de variation thermique de l'aimantation que l'échantillon primitif.

Dans l'esprit des auteurs, l'olivine, constituant fré-

quent des basaltes d'Auvergne, devait jouer un rôle. Nous avons vu la faible valeur trouvée pour l'aimantation à saturation du périclote-olivine (0,18 à 0,20) et des recherches dans cette voie conduiraient fatalement à des résultats négatifs.

Parmi les points de Curie observés sur nos courbes, un seul se rapporte à la magnétite pure suivant les idées habituelles. Devons-nous rapporter les autres à des espèces chimiques pures? Nous ne le croyons pas. Ils sont plutôt spécifiques de certaines structures de solutions solides, comme tendent d'ailleurs à le montrer les travaux suivants encore inédits (1).

M. Chevallier, en partant du ferrite de sodium bien cristallisé, paramagnétique, a obtenu, par hydrolyse prolongée, un oxyde ferrique contenant encore des traces de soude et doué de propriétés fortement magnétiques. Son point de Curie varie dans une large mesure suivant les circonstances de préparation. Or, si nous partons, avec M. Chevallier, de deux échantillons à points de Curie très différents, si nous les mélangeons et suivons leur variation d'aimantation en fonction de la température, la courbe obtenue à l'aller présente très nettement la double chute caractéristique, tandis qu'au retour elle ne présente plus qu'un point de Curie unique, intermédiaire entre les deux précédents. Cela ne semble-t-il pas montrer que le milieu hétérogène constitué par le mélange s'est homogénéisé par chauffage. Il y a donc eu une dissolution réciproque des deux composés en présence et nous aboutissons à une solution solide.

D'autres ferrites : ferrites de chaux, de magnésie

(1) M. Chevallier a bien voulu nous communiquer ces résultats. Nous l'en remercions bien vivement.

notamment, sont assez fortement ferro-magnétiques (1). Il n'y a pas lieu de supposer que ces corps existent bien définis dans les roches volcaniques, car on n'observe pas leurs points de Curie, mais il est naturel d'admettre que divers oxydes, certains d'entre eux demeurés parfois simplement à l'état de traces, sont dissous dans la magnétite formant, au sein de cette dernière, plusieurs substances isomorphes.

Kopp signale (2) qu'il y a deux domaines à considérer dans la variation du rapport $\text{FeO} / \text{Fe}^2\text{O}^3$ qui sont séparés par le degré d'oxydation de la magnétite (31 % de FeO). Les points de Curie varient linéairement entre 861° absolus correspondant à la teneur 31 % et 290° absolus correspondant à la teneur 76 % FeO, donc dans une large limite.

L'étude magnétique des roches volcaniques faite en nous attaquant à deux constantes définies : la saturation et le point de Curie montrent bien que la magnétite n'est pas généralement le constituant magnétique unique de ces roches. La diversité des points de Curie prouve la diversité des constituants. La variabilité des points de Curie prouve la variabilité des constituants. *Nous sommes en présence de solutions solides variables.*

Il nous reste à examiner les conclusions du travail de M. Albert Brun. Pour ce géologue, les roches volcaniques renferment, à part la magnétite, un minéral nouveau qu'il désigne sous le nom de « iozite » ; il s'agit d'oxydes libres titrant jusqu'à 85 % de FeO. Ces résultats s'accordent-ils avec les nôtres ?

D'après A. Brun, l'iozite la plus pure est un mélange

(1) H. FORESTIER : *Thèse, Paris* 1928.

(2) KOPP : *Thèse, Zurich* 1919.

des trois minéraux : fer titané, magnétite, iozite (FeO libre). Un enrichissement d'une poudre par un triage à l'aimant entraînerait une augmentation relative de l'iozite, les grains de fer titané étant moins facilement attirables à l'aimant. L'iozite serait magnétique et magnétipolaire.

S'il y a enrichissement en iozite par triage magnétique, nous devrions obtenir des courbes de variation thermique de l'aimantation d'allures différentes avec les diverses portions d'une poudre soumise au triage magnétique.

Nous avons, à cet effet, expérimenté les échantillons nos 9 et 11, réduits en poudre. Nous avons fait un triage magnétique très minutieux de chaque poudre en la laissant tomber dans un tamis très fin (16 mailles au mm^2) en chute libre dans le champ non uniforme d'un électro-aimant dont nous faisons varier l'intensité du courant. La même allure de courbe a été obtenue avec les diverses portions provenant de la séparation magnétique.

Comme FeO est paramagnétique, les conclusions de l'auteur n'expliquent pas les points de Curie très bas que nous avons observés et qui correspondent à des températures qui ne permettent sans doute pas des réactions chimiques entre les oxydés en présence.

Il nous paraît plus naturel d'admettre que protoxyde et peroxyde entrent tous deux dans une même solution solide. Rien n'empêcherait, en outre, comme nous le disions plus haut, la présence d'autres oxydes. Cette conception suffit pour expliquer les points de Curie assez bas que nous avons trouvés. Le problème est autrement complexe s'il s'agit de rechercher la nature exacte des solutions solides. Si l'on est en droit d'admettre que les

oxydes dissous dans la magnétite sont exclusivement ceux rencontrés dans les autres minéraux constitutants, nous ignorons l'influence de leurs proportions relatives sur les points de Curie et les données des physiciens sont actuellement très incomplètes.

CONCLUSIONS

1° Nous avons choisi, pour cette étude, une région tout particulièrement désignée par la variété de ses produits volcaniques. Nous avons prélevé un grand nombre d'échantillons (plus de 300) pour lesquels nous avons déterminé les valeurs de l'aimantation à saturation qui ont un sens précis.

Nous rapportant à la magnétite dont la valeur de l'aimantation à saturation est bien connue et égale à 92,7 unités absolues, nous avons trouvé une série de valeurs comprises entre 0 et 5 unités, sauf pour certaines enclaves donnant des valeurs supérieures. Une enclave du puy d'Allou (puy riche en enclaves) renferme 10 % de magnétite ;

2° Pour l'étude des variations de l'aimantation en fonction de la température, nous avons réalisé un appareil très simple, très commode d'emploi et se prêtant directement à l'enregistrement photographique ;

3° La gamme des points de Curie des échantillons étudiés varie dans de larges limites ;

4° Les mesures magnétiques faites de manière à obtenir des données ayant une signification définie (saturation à la température ordinaire et points de Curie), montrent qu'il existe rarement dans les roches volcaniques des ferromagnétiques purs et que la présence de solutions solides variables est la règle. L'amplitude de la portion de la courbe de variation thermique de l'aimantation correspondant au point de Curie le plus bas, s'accroît notablement après un premier traitement thermique.

Il est impossible actuellement de tirer directement partie du magnétisme des roches dans l'étude des problèmes pétrographiques.

Il faut d'abord étudier les substances pures et les solutions solides — c'est l'affaire des physiciens — mais ces données sont actuellement très incomplètes. Il faudrait ensuite voir dans quelle mesure des minéraux d'apparence simple ont des propriétés qui se raccordent avec celles des corps purs.

Et ce n'est qu'une fois que les propriétés des minéraux seraient bien connues que l'on pourrait songer à aborder les roches pour analyser leur magnétisme. Il semble que, pendant bien des années encore, on ne puisse faire autre chose que noter les qualités magnétiques des roches à un point de vue purement descriptif.

Si l'on entreprend un travail, il y aura avantage à s'adresser à des quantités bien définies comme nous l'avons fait.

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE DE L'ATMOSPHERE

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 28 juillet 1928

Le Doyen de la Faculté des Sciences

Ch. MAURAIN

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris

POUR LE RECTEUR

l'Inspecteur de l'Académie

A. MAURELLET

2387

Imp. des Presses Universitaires de France. — Vendôme-Paris

Зенце

ЗЕНЦЕ ОН ЪРА ДЕ ДОНЕ
ДЕ НАДЕСНИЧЕНТЕ

